

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP05/050208

International filing date: 19 January 2005 (19.01.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE
Number: 102004013249.6
Filing date: 18 March 2004 (18.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 27 January 2005 (27.01.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

EP05/50208

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 10 2004 013 249.6

Anmeldetag: 18. März 2004

Anmelder/Inhaber: Robert Bosch GmbH, 70442 Stuttgart/DE

Bezeichnung: Bestimmung der Laufzeitdifferenz bei einem Ultraschallströmungssensor mit mehrfacher Nulldurchgangsdetektion

IPC: G 01 F, G 01 P

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 24. November 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Brosig

5 17.02.2004

ROBERT BOSCH GMBH; 70442 Stuttgart

Beschreibung

10

Bestimmung der Laufzeitdifferenz bei einem Ultraschall-
Strömungssensor mit mehrfacher Nulldurchgangsdetektion

15

Die Erfindung betrifft einen Ultraschall-Strömungssensor gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1, sowie ein Verfahren zum Auswerten der Ultraschallsignale bei einem solchen Ultraschall-Strömungssensors gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 9.

20

Ultraschall-Strömungssensoren werden eingesetzt, um insbesondere den Volumen- oder Massestrom oder die Strömungsgeschwindigkeit eines gasförmigen oder flüssigen Mediums zu messen, das durch eine Rohrleitung strömt. Ein bekannter Typ von Ultraschall-Strömungssensoren umfasst zwei in Strömungsrichtung versetzt angeordnete Ultraschallwandler, die jeweils Ultraschallsignale erzeugen und diese an den jeweils anderen Ultraschallwandler aussenden. Die Ultraschallsignale werden vom jeweils anderen Wandler empfangen und mittels einer Elektronik ausgewertet. Der Laufzeitunterschied zwischen dem Ultraschallsignal in Strömungsrichtung und dem Ultraschallsignal in Gegenrichtung ist dabei ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Daraus kann die gewünschte Messgröße, wie z.B. ein Volumenstrom, berechnet werden.

35

40

Fig. 1 zeigt eine typische Anordnung eines Ultraschall-Strömungssensors mit zwei Ultraschallwandlern A,B, die innerhalb einer Rohrleitung 3 angeordnet sind und sich in einem Abstand L gegenüberstehen. In der Rohrleitung 3 strömt ein Fluid 1 mit einer Geschwindigkeit v in Richtung des Pfeils 2. Die Messstrecke L ist gegenüber der Strömungs-

5 richtung 2 um einen Winkel α geneigt. Während einer Messung
 10 senden sich die Ultraschallwandler A,B gegenseitig
 Ultraschallimpulse zu, die je nach Richtung von der Strömung
 entweder verlangsamt oder beschleunigt werden. Die
 Signallaufzeiten sind dabei ein Maß für die zu bestimmende
 Strömungsgeschwindigkeit.

15 Fig. 2 zeigt eine stark vereinfachte schematische Darstellung
 einer Wandleranordnung mit einer daran angeschlossenen
 Steuer- und Auswertelektronik 4. Der Sensor arbeitet nach
 dem sogenannten „sing-around“ Verfahren. Dabei wird durch den
 Empfang eines Ultraschallsignals S1 bzw. S2 an einem der
 Wandler A,B unmittelbar ein Ultraschallsignal in
 Gegenrichtung ausgelöst.

20 Eine Strömungsmessung läuft im wesentlichen wie folgt ab: Die
 Elektronik 4 gibt einen elektrischen Impuls an den Wandler A
 aus, der daraufhin ein Ultraschallsignal S1 generiert und an
 den zweiten Wandler B aussendet. Nach einer Streckenlaufzeit
 t_{12} wird das Signal S1 vom zweiten Wandler B empfangen.

25 Unmittelbar darauf generiert der zweite Wandler B ein
 Ultraschallsignal S2, das nach einer Streckenlaufzeit t_{21} am
 ersten Wandler A ankommt. Sind t_{12} und t_{21} die Schall-
 laufzeiten der Signale von A nach B bzw. umgekehrt, so ergibt
 sich daraus ein Laufzeitunterschied $\Delta t = t_{12} - t_{21}$. Die
 30 Strömungsgeschwindigkeit v kann schließlich gemäß

$$v = \frac{2L}{\cos \alpha} \cdot \frac{\Delta t}{(\Sigma t)^2} \cdot \frac{1}{s}$$

$$v = \left(\frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}} \right) \cdot \frac{L}{2 \cos \alpha}$$

35

berechnet werden. Dabei ist $\Sigma t = t_{12} + t_{21}$ die Summenlaufzeit
 für einen Umlauf oder Umlaufzeit, und s ein Korrekturfaktor
 mit $s = 1 - (\Delta t / \Sigma t)^2$.

5 Fig. 3 zeigt den Signalverlauf eines einzelnen
Ultraschallsignals S1, S2 und die Art und Weise der Bestimmung
eines Empfangszeitpunktes bei einem solchen Signal.
Dargestellt ist hier die sogenannte Zero-Crossing-Detektion
10 (Nulldurchgangsdetektion). Dabei ist der "Empfangszeitpunkt"
des Signals als der erste Nulldurchgang des Signals
definiert, nachdem die Amplitude einen vorgegebenen
Schwellenwert SW (den sogenannten pretrigger level)
überschritten hat. Der Empfangszeitpunkt bei diesem Beispiel
wäre somit der Zeitpunkt t_0 .

15

Wegen des Rauschanteils R, der dem Signal überlagert ist,
führt die Zero-Crossing-Detektion jedoch zu einer relativ
hohen zeitlichen Unschärfe Δt_j in der Pulsflankenerkennung.
Normalerweise ist die Unschärfe Δt_j so groß, dass mit einer
20 einzigen Messung, insbesondere bei kleinen Strömungs-
geschwindigkeiten, keine brauchbare Messgenauigkeit erreicht
werden kann.

25

Zur Erhöhung der Messgenauigkeit wird daher vorzugsweise ein
langgezogenes Ultraschallsignal an den Ultraschallwandlern
erzeugt, wie es in Fig. 4 dargestellt ist. Beim Empfang eines
solchen Signals S1, S2 am anderen Wandler werden dann mehrere
Empfangszeitpunkte pro Ultraschallsignal detektiert. Bei
einer Messung stehen somit mehrere Laufzeitinformationen zur
30 Verfügung, aus denen ein Messwert mit höherer Genauigkeit
bestimmt werden kann, wobei die Messdauer im Vergleich zu
mehreren Einzelmessungen wesentlich geringer ist.

35

Fig. 4 zeigt die Signale P, S1, S2 nochmals in vergrößerter
Darstellung, wobei das Erregersignal P im oberen Teil und das
damit erzeugte Ultraschallsignal S1 bzw. S2 im unteren Teil
der Fig. dargestellt ist. Wie zu erkennen ist, entspricht die
Frequenz des Ultraschallsignals A1, B1 derjenigen des
Erregersignals P. Das Ultraschallsignal A1, B1 hat außerdem
40 eine über mehrere Perioden im wesentlichen gleichbleibende
maximale Amplitude.

5

In Bezug auf die Detektion der Signale S1, S2 ist die Steuer- und Auswerteschaltung 4 z.B. derart realisiert, dass bei jedem Nulldurchgang eines Ultraschallsignals S1 bzw. S2 (nachdem die Amplitude des Signals einen vorgegebenen Schwellenwert SW überschritten hat) ein Empfangszeitpunkt t_1 - t_n detektiert wird.

10

15

20

Fig. 5 zeigt die Empfangszeitpunkte der Signale S1, S2 in der Reihenfolge ihres Eintreffens an den Ultraschallwandlern A, B. Das Signal S2 kommt in diesem Beispiel um mehrere Signalperioden früher am Wandler A an als das Signal S1 am Wandler B. Aus den zusammengehörigen Empfangszeitpunkten $t_1', t_1'', \dots, t_n', t_n''$ wird jeweils eine Laufzeitdifferenz $\Delta t_1, \dots, \Delta t_n$ ermittelt. Hierzu sind üblicherweise n Zähler erforderlich, mit denen die Laufzeitunterschiede Δt_i zusammengehöriger Empfangsereignisse gezählt werden. Dies ist relativ aufwändig und kompliziert.

25

30

Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Ultraschall-Strömungssensor bzw. ein entsprechendes Verfahren zu schaffen, mit dem die Laufzeiten zweier langgezogener Ultraschallsignale mit möglichst geringem technischen Aufwand bestimmt werden können. Dabei sollte die Bestimmung der Laufzeiten auch bei ungünstigen Strömungsbedingungen oder bei einer Umkehr der Strömungsrichtung möglich sein.

35

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die im Patentanspruch 1 sowie im Patentanspruch 9 angegebenen Merkmale gelöst. Weitere Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand von Unteransprüchen.

40

Ein wesentlicher Aspekt der Erfindung besteht darin, eine Steuer- und Auswerteeinheit mit zwei Zählern vorzusehen, von denen der erste die Anzahl der vollen Intervalle eines ersten Signals (z.B. eines Referenzsignals oder eines ersten Ultraschallsignals) wenigstens bis zum ersten

- 5 Empfangszeitpunkt eines Ultraschallsignals zählt, und der zweite Zähler jeweils die Zeitspanne zwischen jeweils einem ersten und einem zweiten von mehreren paarweise zusammengefassten Schalt- bzw. Empfangszeitpunkten der beiden Signale zählt. Dadurch, dass die Laufzeit bzw.
- 10 Laufzeitdifferenz der Ultraschallsignale aus mehreren Zeitdauern ermittelt wird, die sich zeitlich nicht überlappen, kann die Laufzeit bzw. Laufzeitdifferenz mit nur zwei Zählern und folglich mit sehr geringem technischen Aufwand ermittelt werden.
- 15 Ein Ultraschall-Strömungssensor, der nach dem vorstehend beschriebenen Messprinzip arbeitet, kann auf unterschiedliche Art und Weise betrieben werden. Eine erste Möglichkeit besteht darin, an den beiden Ultraschallwandlern gleichzeitig
- 20 je ein Ultraschallsignal auszusenden und die Laufzeitdifferenz der Ultraschallsignale mittels der zwei Zähler zu messen. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, zunächst nur an einem der Wandler ein Ultraschallsignal auszusenden und dessen Laufzeit unter Berücksichtigung eines Taktsignals zu
- 25 messen, und danach die gleiche Laufzeitmessung am anderen Wandler durchzuführen.
- 30 Im Folgenden wird zunächst auf diejenige Betriebsart des Strömungssensors eingegangen, bei der die Ultraschallsignale gleichzeitig von den Wandlern ausgesendet werden. In diesem Fall zählt der erste Zähler die Anzahl der vollen Intervalle (definiert durch jeweils zwei aufeinander folgende Empfangszeitpunkte) des zuerst eintreffenden
- 35 Ultraschallsignals wenigstens bis zum ersten Empfangszeitpunkt des später eintreffenden Ultraschallsignals, und der zweite Zähler jeweils die Zeitspanne zwischen jeweils einem ersten und einem zweiten von mehreren paarweise zusammengefassten Empfangszeitpunkten unterschiedlicher Ultraschallsignale.
- 40

- 5 Die paarweise zusammengefassten Empfangszeitpunkte (Empfangspaare), deren Zeitspanne vom zweiten Zähler gemessen wird, umfassen vorzugsweise jeweils einen Empfangszeitpunkt des einen Ultraschallsignals und einen unmittelbar darauf folgenden Empfangszeitpunkt des anderen Ultraschallsignals.
- 10 Die Empfangspaare sind vorzugsweise derart ausgewählt, dass sie unmittelbar aufeinander folgen, ohne Auslassung einzelner Empfangszeitpunkte. Die Auswerte- und Steuereinheit bildet aus den gemessenen Zeitspannen zwischen den Empfangspaaren vorzugsweise einen Mittelwert. Aus dem Zählerstand des ersten
- 15 Zählers und dem gemittelten Zählerstand des zweiten Zählers kann somit ein relativ genauer Wert für die Laufzeitdifferenz der Ultraschallsignale bestimmt werden.
- 20 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird die paarweise Zuordnung jeweils zweier Empfangszeitpunkte gemäß folgender Regel durchgeführt: Die Steuer- und Auswerteeinheit prüft zunächst, ob der erste Empfangszeitpunkt des später eintreffenden Signals zeitlich näher am vorhergehenden oder näher am folgenden
- 25 Empfangszeitpunkt des zuerst eingetroffenen Ultraschallsignals als eine vorgegebene Zeitschwelle liegt, wobei der erste Zähler im ersten Fall die Zeitdauer (bzw. Anzahl der vollen Intervalle) vom ersten Empfangszeitpunkt des ersten Signals bis zu demjenigen Empfangszeitpunkt des ersten
- 30 Signals bestimmt, der dem ersten Empfangszeitpunkt des später eintreffenden Ultraschallsignals vorhergeht, und im anderen Fall bis zu demjenigen Empfangszeitpunkt des ersten Ultraschallsignals zählt, der dem ersten Empfangszeitpunkt des später eintreffenden Ultraschallsignals folgt. Der erste
- 35 Zähler zählt also die Anzahl der vollen Intervalle des ersten Ultraschallsignals bis zum ersten Empfangszeitpunkt des später eintreffenden Ultraschallsignals oder ein Intervall mehr, je nach Lage des ersten Empfangszeitpunkts des später eintreffenden Ultraschallsignals im Intervall des ersten
- 40 Ultraschallsignals.

5 Der zweite Zähler zählt vorzugsweise die Zeitdauern zwischen
je zwei aufeinanderfolgenden Empfangszeitpunkten
unterschiedlicher Signale. (Die Reihenfolge der
Empfangszeitpunkte, aus denen ein Empfangspaar gebildet wird,
kann sich aufgrund von Signalverschiebung während der Messung
10 ändern).

Die Laufzeitdifferenz wird im ersten Fall aus dem Zählerstand
des ersten Zählers und einem Mittelwert des Zählerstands des
zweiten Zählers durch Addition, im zweiten Fall durch
15 Subtraktion gebildet, wobei die unterschiedliche Wertigkeit
beider Zähler zu berücksichtigen ist. Die unterschiedliche
Auswahl des ersten Empfangspaares in Abhängigkeit von der
relativen Lage des ersten Empfangszeitpunkts des später
ankommenden Ultraschallsignals hat den wesentlichen Vorteil,
20 dass die Auswertung sehr robust gegenüber einem Signaljitter
(Rauschen oder Zittern des Signals) oder turbulenter Strömung
ist. Die Fehlerhäufigkeit wird somit wesentlich reduziert.

Der zweite Zähler ist vorzugsweise als Aufwärts/Abwärtszähler
25 realisiert, der in Abhängigkeit von der Reihenfolge der
paarweise zusammengefassten Empfangszeitpunkte die
Zählrichtung ändert und entweder aufwärts oder abwärts zählt.
Auf diese Weise können insbesondere Verschiebungen in den
langgezogenen Ultraschallsignalen z.B. aufgrund von
30 turbulenter Strömung, berücksichtigt werden.

Vorzugsweise kann auf eine explizite Addition oder
Subtraktion beider Zählerstände verzichtet werden, indem der
erste Zähler ebenfalls als Aufwärts/Abwärtszähler realisiert
35 wird, der bei Überschreiten der Zählergrenzen des zweiten
Zählers einen Übertrag in positiver oder negativer Richtung
vom zweiten Zähler erhält.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung
40 akkumuliert der zweite Zähler die Zeitspannen von p Paaren
von Empfangszeitpunkten, wobei p eine Zweierpotenz ist. Der

5 Mittelwert des Zählerstandes des zweiten Zählers ergibt sich dann nach einer Division durch p . Wenn p als Zweierpotenz gewählt wurde, kann der Mittelwert in einfacher Weise durch eine Schieberegisteroperation gebildet werden, bei welcher die Kommastelle um $\log_2 p$ Stellen verschoben wird.

10

Im Folgenden wird nun auf diejenige Betriebsart des Strömungssensors eingegangen, bei der die Ultraschallsignale nacheinander ausgesendet und die Signallaufzeiten unter Berücksichtigung eines Referenzsignals ermittelt werden. Wie auch in der ersten Betriebsart wird ein langgezogenes Ultraschallsignal mittels eines Taktsignals (Erregersignals) erzeugt. Dieses Taktsignal kann selbst als Referenzsignal dienen. Alternativ kann aus dem Taktsignal das Referenzsignal abgeleitet werden, indem sowohl bei den positiven als auch

20 negativen Flanken des Taktsignals ein Spannungspuls mit einer definierten Flanke (z.B. positiv) erzeugt wird. Das Ultraschallsignal wird zunächst nur von einem der Wandler ausgesendet und am anderen Wandler empfangen.

25 Der erste Zähler zählt dann die Anzahl der vollen Intervalle des Referenzsignals wenigstens bis zum ersten Empfangszeitpunkt des eintreffenden Ultraschallsignals, und der zweite Zähler jeweils die Zeitspanne zwischen jeweils einem ersten und einem zweiten von mehreren paarweise

30 zusammengefassten Schalt- bzw. Empfangszeitpunkten der Signale. Der erste Zähler zählt also die Anzahl der vollen Taktperioden, und der zweite Zähler die Restzeit bis zum Eintreffen des Ultraschallsignals unter Berücksichtigung mehrerer Taktflanken-Empfangszeitpunkt-Paare (Empfangspaare).

35 Das Ergebnis dieser Messung ist die Laufzeit des Ultraschallsignals in der einen Richtung. Danach wird die Laufzeit eines Ultraschallsignals in der anderen Richtung gemessen und aus den beiden Laufzeiten die gesuchte Messgröße berechnet.

40

- 5 Die vorstehend bezüglich der ersten Betriebsart aufgeführten Ausführungsmöglichkeiten gelten in entsprechender Weise auch für die zweite Betriebsart.

Bei der Detektion eines Empfangsereignisses (z.B.
10 Nulldurchgangs) eines Ultraschallsignals wird in der Auswerteschaltung üblicherweise ein digitales Signal gesetzt (z.B. von low auf high), das den genauen Empfangszeitpunkt des Empfangsereignisses anzeigt. Die Flanke dieses Signals ist mit einer Zeitungenauigkeit (jitter) behaftet. Bei der
15 Abtastung des Signals kommt es zu Aliasing-Effekten, wenn die Taktrate des Abtastsignals nicht ausreichend hoch gewählt wird (Nyquist-Kriterium). Gemäß der Erfindung wird vorgeschlagen, das elektrische Signal mit einer Abtastrate
20 abzutasten, die deutlich höher ist als der Kehrwert der Zeitungenauigkeit eines Empfangsereignisses. Dadurch kann die Genauigkeit der Strömungsmessung wesentlich erhöht werden.

Im Folgenden wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen beispielhaft näher erläutert. Es zeigen:

25 Fig. 1 ein typisches Beispiel eines Ultraschall-Strömungssensors mit zwei Ultraschallwandlern gemäß dem Stand der Technik;

30 Fig. 2 einen Ultraschall-Strömungssensor mit einer zugehörigen Steuer- und Auswerteschaltung;

Fig. 3 ein typisches Ultraschallsignal gemäß dem Stand der Technik und die Detektion des Empfangszeitpunkts;

35 Fig. 4 ein langgezogenes Ultraschallsignal mit mehreren zur Zeitmessung genutzten Nulldurchgängen;

40 Fig. 5 die Ermittlung von n Differenzlaufzeiten mittels n Zählern;

5 Fig. 6 die Ermittlung der Differenzlaufzeit der
Ultraschallsignale mittels zweier Zähler gemäß einer ersten
Ausführungsform der Erfindung;

Fig. 7 eine Steuer- und Auswerteschaltung für die Bestimmung
10 der Laufzeitdifferenz gemäß Fig. 6;

Fig. 8 die Bestimmung der Laufzeitdifferenz zweier
Ultraschallsignale gemäß einer anderen Ausführungsform der
Erfindung;

15 Fig. 9 eine Steuer- und Auswerteeinheit für die Bestimmung
der Laufzeitdifferenz zweier Ultraschallsignale gemäß dem
Verfahren von Fig. 8;

20 Fig. 10 ein Beispiel einer fehlerhaften Auswertung der
Laufzeitdifferenz bei sich verschiebenden
Empfangszeitpunkten;

Fig. 11 die Auswertung der Laufzeitdifferenz bei zwei
25 ungleichmäßigen Ultraschallsignalen gemäß einer bevorzugten
Ausführungsform der Erfindung;

Fig. 12 eine Steuer- und Auswerteschaltung zur Bestimmung der
Laufzeitdifferenz zweier Ultraschallsignale gemäß dem
30 Verfahren von Fig. 11;

Fig. 13 eine schematische Darstellung eines einzelnen
Empfangsereignisses;

35 Fig. 14 ein Abtastsignal mit niedrigerer und höherer
Frequenz; und

Fig. 15 die Normalverteilung der Zeitungenauigkeit bei der
Detektion einzelner Empfangsereignisse.

5 Bezüglich der Erläuterung der Fig. 1 bis 5 wird auf die Beschreibungseinleitung verwiesen.

Fig. 6 zeigt ein Beispiel für den zeitlichen Verlauf der an
den Ultraschallwandlern A,B empfangenen Ultraschallsignale
10 S1,S2, die gleichzeitig am jeweils anderen Wandler B,A
ausgesendet wurden. Die positiven Flanken der digitalen Pulse
A1-An bzw. B1-Bn kennzeichnen jeweils den Empfang eines
Nulldurchgangs der Ultraschallsignale S1 bzw. S2 zu den
Zeitpunkten t_i' bzw. t_i'' . Der Laufzeitunterschied Δt der
15 beiden Ultraschallsignale S1,S2 ist gleich der Zeitdauer vom
Puls A1 bis zum Puls B1.

Der Laufzeitunterschied kann ausgedrückt werden als eine
Zeitdauer $\Delta t'$ von Puls A1 bis A3 plus ein Restwert $\Delta t''$
20 zwischen den Pulsen A3 und B1, wobei gilt $\Delta t = \Delta t' + \Delta t''$. Um
den statistischen Messfehler zu verringern, werden hier
möglichst viele Nulldurchgänge der Signale S1,S2
berücksichtigt und mehrere Rest-Zeitdauern $\Delta t''$ gemessen, die
schließlich gemittelt werden. Der Laufzeitunterschied Δt der
25 Ultraschallsignale S1,S2 ergibt sich somit aus dem Wert von
 $\Delta t'$ und dem Mittelwert der Zeiten $\Delta t_i''$.

Die Dauer der Zeiten $\Delta t'$ bzw. $\Delta t_i''$ kann in einfacher Weise
mittels zweier Zähler 5a,5b gemessen werden. Der erste Zähler
30 5a zählt dabei die Dauer der vollen Intervalle (ein Intervall
entspricht der Dauer zwischen zwei aufeinander folgenden
Pulsen, z.B. A1,A2, des selben Ultraschallsignals) bis zum
Eintreffen des ersten Pulses B1 des später ankommenden
Ultraschallsignals S1. Der Zählerstand des ersten Zählers 5a
35 bildet dabei eine grobe Abschätzung der Laufzeitdifferenz Δt
der beiden Ultraschallsignale S1,S2.

Ein zweiter Zähler misst jeweils fortlaufend die Zeitspannen
 $\Delta t_i''$ zwischen jeweils zwei paarweise zusammengefassten Pulsen
40 A4,B2; A5,B3; etc. und summiert dadurch gleichzeitig die
Messwerte. Die Pulspaare sind dabei unmittelbar aufeinander

5 folgend gewählt. Aus dem endgültigen Zählerwert wird schließlich ein Mittelwert gebildet, der zum Zählerstand des ersten Zählers 5a hinzu addiert wird. Bei Verwendung digitaler Zähler 5a, 5b bildet der Zählerstand des ersten Zählers 5a vorzugsweise die höherwertigen Bits (hsb: high significant bits) und der Zählerstand des zweiten Zählers die niederwertigen Bits (lsb: least significant bits). Unter den zwei Voraussetzungen, dass erstens die Bitbreiten des ersten Zählers 5a und des zweiten Zählers 5b richtig aneinander angepasst sind und zweitens die Ultraschallfrequenz mittels
10 Teilung durch eine 2er-Potenz aus dem Zählertakt des lsb-Zählers erzeugt wurde, können die lsb-Bits des zweiten Zählers direkt an die hsb-Bits des ersten Zählers angefügt und zu einer einzigen Binärzahl zusammengesetzt werden, die proportional zur Laufzeitdifferenz Δt ist.

20 Der Zählerstand des zweiten Zählers 5b kann darüber hinaus besonders einfach gemittelt werden, wenn insgesamt p Messungen von p Intervallen Δt_i durchgeführt werden und die Anzahl p eine Zweierpotenz ist. In diesem Fall entspricht die
25 Mittelung des binären Zählerwerts (Teilung durch p) gleich einer Schieberegisteroperation um $\log_2 p$, bei der die Kommastelle um $\log_2 p$ -Stellen nach links verschoben wird. Im dargestellten Beispiel von Fig. 6 werden $p = 2^5 = 32$ Messungen von Δt_i durchgeführt und somit die Kommastelle um
30 5 Bit nach links verschoben. Die endgültige Laufzeitdifferenz Δt ergibt sich somit aus dem Zählerstand des ersten Zählers 5a und den höherwertigen Bits (hier 10 Bit) des zweiten Zählers 5b in Einheiten der Periodendauer des lsb-Zählertaktes, wobei die 5 niederwertigen Bits des zweiten
35 Zählers entsprechende Nachkommastellen sind.

Alternativ zur Darstellung von Fig. 6 könnte die Laufzeitdifferenz Δt der Signale S1, S2 auch als Differenz der Zeitspannen [A1 bis A4] und [B1 bis A4] dargestellt werden.
40 Der erste Zähler 5a müsste ein Intervall mehr als bis zum Eintreffen des ersten Pulses B1, also von A1 bis A4 zählen,

5 und der zweite Zähler 5b jeweils die Intervalle zwischen
B2,A5;B3,A6; etc.. Hierbei gilt: $\Delta t = t[A1,A4] - t[B1,A4]$.

10 In einer zweiten Betriebsart des Ultraschall-Strömungs-
sensors, in der die Ultraschallsignale S1,S2 nicht
gleichzeitig, sondern nacheinander ausgesendet werden, gelten
die gleichen Grundsätze, wie sie bezüglich der Fig. 6 bis 15
beschrieben werden. In diesem Fall wird jedoch zunächst die
15 Laufzeit Δt eines Ultraschallsignals (z.B. S1) in einer
Richtung und danach die Laufzeit Δt eines Ultraschallsignals
(z.B. S2) in der Gegenrichtung unter Berücksichtigung eines
Referenzsignals (P) gemessen. In Fig. 6,8,10 oder 11 wäre das
Signal S2 als das Referenzsignal P zu betrachten, welches aus
dem selben Taktsignal abgeleitet wurde, mit dem das
langgezogene Ultraschallsignal S1 erzeugt wurde, wobei die
20 Empfangzeitpunkte A1 in diesem Fall Schaltzeitpunkte (z.B.
positive Flanken) des Referenzsignals P wären. (Auf eine
separate Darstellung wurde daher verzichtet).

25 Der erste Zähler 5a zählt wie in der ersten Betriebsart die
Anzahl der vollen Intervalle des Referenzsignals P wenigstens
bis zum ersten Empfangszeitpunkt B1 des eintreffenden
Ultraschallsignals S1, und der zweite Zähler 5b misst jeweils
die Zeitspanne $\Delta t_i''$ zwischen jeweils einem ersten und einem
30 zweiten von mehreren paarweise zusammengefassten Schalt- bzw.
Empfangszeitpunkten A_i, B_i der Signale P,S1. Der erste Zähler
zählt also die Anzahl der vollen Perioden des Referenzsignals
und der zweite Zähler die Restzeit $\Delta t_i''$ bis zum Eintreffen
des Ultraschallsignals. Das Ergebnis dieser Messung ist die
Laufzeit Δt des Ultraschallsignals S1. Danach wird die
35 Laufzeit des Ultraschallsignals S2 in der anderen Richtung
gemessen und aus den beiden Laufzeiten Δt die gesuchte
Messgröße berechnet.

40 Fig. 7 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer Steuer- und
Auswerteschaltung 4 mit zwei digitalen Zählern 5a,5b zur
Bestimmung der Laufzeitdifferenz Δt . Die Schaltung hat die

5 Eingänge Input A für das Signal S2 und Input B für das Signal S1. Das Schaltungsmodul 6 erhält die Pulse A_i und B_i von den Wandlern A,B an den Eingängen „Input A“ bzw. „Input B“, lässt die zuerst ankommenden Pulse (hier A_1-A_3) bis auf den ersten Puls überhaupt durch (d.h. hier: A_2-A_3) und gibt diese an den
10 ersten Zähler 5a weiter, bis am anderen Eingang „Input B“ der erste Puls (hier B_1) des später ankommenden Ultraschallsignals S1 eintrifft. Der erste Zähler zählt somit bis 2 (zwei volle Intervalle) und hört danach auf zu zählen. Der Zählerstand hsb des ersten Zählers 5a ist mit dem
15 Bezugszeichen 14 gekennzeichnet. Die Zählrate des ersten Zählers 5a entspricht der Frequenz der Ultraschallsignale S1,S2.

Nach dem Eintreffen der ersten Pulses B_1 des Signals S1
20 aktiviert das Modul 6 ein zweites Modul 7 mittels eines Signals "enable". Das zweite Modul 7 erhält ebenfalls die Pulse A_i, B_i an den Eingängen „Input A“ bzw. „Input B“ und aktiviert jeweils den zweiten Zähler 5b während der Zeitspannen $A_4, B_2; A_5, B_3$, etc. (Der Ausgang „Cnt enable“ wird
25 dann high). Der Ausgang „cnt enable“ ist mit einem AND-Gatter 10 verbunden, dessen Ausgang mit dem Takteingang Clk des zweiten Zählers 5b verbunden ist. Der zweite Zähler 5b zählt somit mit der am Eingang 16 zugeführten Taktrate „clock“
aufwärts, solange der Ausgang „cnt enable“ des zweiten Moduls 7 high ist und die Anzahl der gemessenen Intervalle $\Delta t_i''$
30 kleiner ist als eine vorgegebene Anzahl von Intervallen, $\Delta t_i''$, die am Eingang 11 vorgegeben werden kann. Die Anzahl der bereits gemessenen Intervalle $\Delta t_i''$ wird vom Zähler 12 gezählt, der mit dem Ausgang „cnt enable“ des zweiten Moduls
35 7 verbunden ist. Der invertierte Ausgang eines Flip-Flops 9 ist solange high, bis die gemessene Anzahl der Intervalle $\Delta t_i''$ gleich der am Eingang 11 vorgegebenen Anzahl von Intervallen ist. Die Gleichheit der Anzahl wird von einem Logikgatter 8 erkannt, das das Flip-Flop 9 setzt. Der
40 invertierte Ausgang IQ geht somit in den Zustand low und der zweite Zähler 5b hört auf zu zählen. Der Zählerstand lsb des

5 zweiten Zählers 5b wird schließlich am Ausgang 13 ausgelesen und kann, wie vorstehend beschrieben, durch eine Schieberegisteroperation gemittelt werden. Die Schaltung wird über den Eingang „start“ zurückgesetzt, so dass eine neue Messung beginnen kann.

10

Sofern die Messung gemäß der vorstehend beschriebenen zweiten Betriebsart durchgeführt wird, erhalten die Module 6,7 z.B. am Eingang „Input A“ anstelle des Wandler-Ausgangssignals S2 das Referenzsignal P. Die Schaltung von Fig. 7 arbeitet ansonsten in gleicher Weise wie in der ersten Betriebsart.

15

Fig. 8 zeigt zwei an den Wandlern A,B empfangene Ultraschallsignale S1,S2, deren Empfangszeitpunkte A1-A8 bzw. B1-B6 sich im Verlauf der Signale S1,S2 gegeneinander verschieben. Eine derartige Signalverschiebung kann insbesondere durch turbulente Strömungsverhältnisse hervorgerufen werden, die einen Signaljitter (zeitliches Rauschen oder Zittern) im Signal S1,S2 bewirken. Dadurch kann sich auch die Reihenfolge der einzelnen Pulse A1-A8 gegenüber den Pulsen B1-B6 vertauschen. Bei einer Auswertung der Intervalle $\Delta t_i''$ gemäß dem Verfahren von Fig. 6 würde der zweite Zähler 5b die Intervalle A4,B2;A5,B4;A6,B5, etc. und damit falsche Intervalle auswerten, wodurch ein erheblicher Messfehler entstehen würde.

20

25

30

35

40

Gemäß dem in Fig. 8 dargestellten Verfahren wird daher vorgeschlagen, die Pulse A_i des ersten Signals S2 und die Pulse B_i des zweiten Signals S1 wiederum jeweils paarweise zusammenzufassen, so dass aus jeweils zwei aufeinander folgenden Pulsen A_i,B_i unterschiedlicher Signale ein Pulspaar gebildet wird, und jedem Pulspaar A4,B2;B3,A5; etc. ein Vorzeichen (+/-) gemäß der Reihenfolge des Auftretens der beiden Pulse A_i,B_i zuzuordnen. Der zweite Zähler 5b wird dann abhängig von diesem Vorzeichen (+/-) während der zugehörigen Zeitdauer $\Delta t_i''$ eines Pulspaares A_i,B_i entweder hoch- oder heruntergezählt. Die einzelnen Zählwerte für die Zeiten $\Delta t_i''$

5 werden vom zweiten Zähler 5b vorzugsweise akkumuliert.
Überschreitet der Zählerstand des zweiten Zählers 5b die
Zählergrenzen des Zählers 5b (entweder 0 oder den durch die
Bitbreite des Zählers gegebenen maximalen Zählerstand)
erfolgt ein Übertrag an den ersten Zähler 5a, d.h. der erste
10 Zähler 5a wird um eins hoch- oder heruntergezählt.

Nach Auswertung von p Zeitintervallen $\Delta t_i''$ wird der
Zählerstand lsb des zweiten Zählers 5b wiederum gemittelt.
Sofern p eine Zweierpotenz ist, können die Zählerstände des
15 hsb-Zählers 5a und des lsb-Zählers 5b ohne weitere
arithmetische Operation einfach zu einer einzelnen Binärzahl
zusammengefügt werden, wie dies in Fig. 8 unten dargestellt
ist, wobei die Binärzahl dann proportional zur
Laufzeitdifferenz oder Durchflussrate ist.

20 Fig. 9 zeigt eine Ausführungsform einer Auswerteeinheit 4 zur
Durchführung des vorstehend bezüglich Fig. 8 beschriebenen
Verfahrens. Die Erzeugung der Ultraschallsignale S1, S2 aus
dem Takt eines Quarzoszillators sowie die Ablaufsteuerung des
25 gesamten Messvorgangs wurden dabei aus Gründen der
Übersichtlichkeit weggelassen.

Die Auswerteschaltung ist in wesentlichen Teilen identisch
aufgebaut wie die Auswerteschaltung von Fig. 7, auf die hier
30 verwiesen wird. Die von den Wandlern A, B erzeugten
elektrischen Pulse A_i, B_i werden an den Eingängen „Input A“
und „Input B“ der Module 6 und 7 eingespeist. Das
Schaltungsmodul 7 lässt die zuerst ankommenden Pulse bis auf
den aller ersten (hier A2-A3) durch und gibt entsprechende
35 Signale an den ersten Zähler 5a weiter, bis der erste Puls B1
des anderen Ultraschallsignals S1 eintrifft. Die Zählrichtung
des ersten Zählers 5a wird vom Modul 6 über den Ausgang +/-
vorgegeben. (Die Zählrichtung ist positiv oder negativ, je
nachdem, welches Signal S1, S2 zuerst ankommt).

5 Das Modul 7 erkennt ebenfalls die Reihenfolge der Pulse A_i, B_i
eines Pulspaares A_i, B_i und gibt entsprechend für jedes
Pulspaar individuell entweder ein positives oder ein
negatives Vorzeichen am Ausgang $+/-$ aus. Das Vorzeichen wird
über ein XOR-Glied 17 und ein NOT-Glied 18 an den zweiten
10 Zähler 5b geleitet, der entsprechend aufwärts oder abwärts
zählt. Der Takt „clock“ am Eingang 16 gelangt, wie bereits zu
Fig. 7 beschrieben wurde, nur während der Zeitintervalle $\Delta t_i''$
über das AND-Gatter 10 zum zweiten Zähler 5b. Der Takt
„clock“ wird während der Zeitintervalle $\Delta t_i''$ vom Modul 7 am
15 Ausgang „Cnt enable“ freigegeben und gelangt somit zum
zweiten Zähler 5b.

Fig. 10 zeigt zwei nacheinander an den Ultraschallwandlern A
bzw. B ankommende Ultraschallsignale S_2 bzw. S_1 , deren
20 Nulldurchgänge nicht gleichmäßig an den Wandlern A, B
ankommen, sondern gegeneinander verschoben sind. Die Pulse
 A_1-A_8 bzw. B_1-B_8 treffen dabei zeitlich so an den
Ultraschallwandlern A, B ein, dass sich die Intervalle $\Delta t_i''$
der Pulspaare A_5, B_3 und A_6, B_4 zeitlich überlappen. Zeitlich
25 überlappende Intervalle $\Delta t_i''$ können jedoch nicht von einem
einigen Zähler gezählt werden. Es kommt daher zu einem
Auswertefehler, wie anhand der Zählerstände hsb und lsb des
ersten 5a bzw. zweiten Zählers 5b zu erkennen ist.

30 Der erste Zähler 5a zählt, wie bisher, die Anzahl der vollen
Intervalle (von A_1-A_3) des zuerst ankommenden Signals S_2 , bis
zum Eintreffen des ersten Pulses B_1 und hört danach auf zu
zählen. Der endgültige Zählerstand des ersten Zählers 5a ist
daher $hsb = 2$. Der zweite Zähler 5b zählt dann während des
35 Intervalls A_4, B_2 z.B. um 8 Zähler, während des Intervalls
 A_5, B_3 um weitere 9 Zähler nach oben, überspringt den Puls A_6
und zählt dann wieder im Intervall A_7, B_4 um 2 Zähler nach
oben, so dass der Gesamtzählerstand $lsb = 19$ ist.

40 Der Grund für die fehlerhafte Auswertung liegt in diesem Fall
darin, dass der erste Puls B_1 des Signals S_1 erst kurz vor

- 5 dem nächsten Signal A4 des anderen Signals S2 eintrifft und bereits durch eine geringe Signalverschiebung überlappende Zeitdauern (A5,B3 und A6,B4) erzeugt werden.

10 Fig. 11 zeigt ein verbessertes Auswerteverfahren, bei dem derartige zeitliche Überlappungen vermieden werden können. Hierzu prüft die Auswerteeinheit 4, ob der erste Puls B1 des später eintreffenden Ultraschallsignals S1 zeitlich näher am vorhergehenden Puls A3 oder näher am nachfolgenden Puls A4 des anderen Signals S2 liegt. Eine Zeitschwelle t_s , die in
15 diesem Beispiel in der Mitte des Intervalls A3,A4 liegt, dient in diesem Fall als Vergleichsmaßstab. Je nach Lage des ersten Empfangszeitpunkts B1 des später eintreffenden Ultraschallsignals S1 im Intervall des ersten Ultraschallsignals S2, zählt der erste Zähler 5a die Anzahl der vollen
20 Intervalle bis zum ersten Empfangszeitpunkt B1 oder ein Intervall mehr. Für die Auswertung gilt entweder $\Delta t = \Delta t_1' + \Delta t_1''$ (nicht gezeigt, vergleichbar z.B. mit Fig. 6) oder $\Delta t = \Delta t' - \Delta t''$, wobei $\Delta t'$ drei Intervalle umfassen würde.

25

Im ersten Fall (der Puls B1 liegt zeitlich vor t_s , nicht
gezeigt, vergleichbar z.B. mit Fig. 8) zählt der erste Zähler 5a die Anzahl der vollen Intervalle bis zum Eintreffen des
30 ersten Pulses B1. Danach werden alle weiter folgenden Pulse entsprechend der Reihenfolge ihres Eintreffens als Pulspaare A_i, B_i interpretiert, deren zugeordnete Zeitintervalle $[A_i, B_i]$ vom zweiten Zähler 5b gemessen werden. In Fig. 8. z.B. ist A4,B2 das erste dieser Pulspaare. Dieses Verfahren entspricht dem Verfahren von Fig. 8 oder Fig. 10. Der Zählerstand des
35 ersten Zählers 5a und des zweiten Zählers 5b werden (nach einer Mittelung) schließlich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wertigkeiten der beiden Zähler addiert bzw. einfach zusammengesetzt.

40 Im zweiten Fall (der erste Puls B1 kommt zeitlich nach der Zeitschwelle t_s an) zählt der erste Zähler 5a ein Intervall

5 weiter, d.h. alle vollen Intervalle $[A_i, A_{i+1}]$ bis
einschließlich des Intervalls $[A_3, A_4]$ des Signals S2, in das
der erste Puls B1 des späteren Ultraschallsignals S1 fällt.
Der Zählerstand hsb des ersten Zählers 5a zählt hier somit
bis drei. Ab diesem Zeitpunkt werden wiederum alle weiteren
10 Pulse in der Reihenfolge ihres Eintreffens als Paare A_i, B_i
einander zugeordnet. Im Beispiel in Fig. 11. ist also B2, A5
das erste dieser Pulspaare. Der zweite Zähler 5b zählt dann
wiederum während der Zeitdauer eines Pulspaares A_i, B_i , wobei
der Zählerstand in Abhängigkeit von der Reihenfolge der Pulse
15 A_i, B_i entweder aufwärts oder abwärts gezählt wird

Pulspaare in der Reihenfolge B_i, A_i werden abwärts und
Pulspaare in der Reihenfolge A_i, B_i aufwärts gezählt. Der
Zählerstand lsb des zweiten Zählers 5b wird daher zunächst
20 negativ (z.B. lsb = -2), zählt während des zweiten Intervalls
A6, B3 dann zurück auf 0 und während des dritten Intervalls
A7, B4 um 2 Zähler nach oben auf z.B. lsb = 2. Der erste
Zähler 5a erhält bei Überschreiten der Zählergrenzen des
zweiten Zählers 5b jeweils einen Übertrag und zählt somit
25 zunächst zurück auf einen Zählerstand hsb = 2 und danach
wieder auf einen Zählerstand hsb = 3.

Fig. 12 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer Steuer- und
Auswerteschaltung 4, die nahezu identisch aufgebaut ist wie
30 die Auswerteschaltung von Fig. 9. Wie auch bei den Fig. 7 und
9 wurde die Erzeugung der Ultraschallsignale S1, S2 aus dem
Takt eines Quarzoszillators, sowie die Ablaufsteuerung aus
Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen. Gleiche
Bestandteile sind mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

35 Im Unterschied zu Fig. 9 umfasst das Modul 6 der
Auswerteschaltung von Fig. 12 einen zusätzlichen Takteingang
"clock", der eine zusätzliche Zeitmessung ermöglicht, um zu
entscheiden, ob der erste Puls B1 des später ankommenden
40 Ultraschallsignals S1 vor oder nach der in Fig. 11
eingezeichneten Zeitschwelle t_s eintrifft. Zu Zwecken der

5 Zeitmessung kann z.B. wiederum ein Zähler vorgesehen sein, der im Modul 6 integriert sein kann. Der Ausgang „enable“ des Moduls 6 wird somit je nach Lage des ersten Empfangszeitpunkts B1 des Signal S1 früher oder später aktiv.

10 Fig. 13 zeigt ein internes Signal der Auswerteschaltung 4, das bei der Detektion eines Empfangsereignisses (z.B. eines Nulldurchganges) eines empfangenen Ultraschallsignals S1, S2 von low auf high geschaltet wird. Der Zeitpunkt der steigenden Signalflanke hat aufgrund von Signaljitter
15 (Signalzittern bzw. -rauschen) eine gewisse Zeitungenauigkeit Δt_j .

Figur 15 zeigt die jitter-bedingte Häufigkeitsverteilung des detektierten Zeitpunkts für den Nulldurchgang im Falle
20 mehrerer nacheinander durchgeführter Messungen. Die Standardabweichung ist dabei mit $\pm \Delta t_j$ angegeben. Die Häufigkeitsverteilung kann z.B. einer Normalverteilung mit der entsprechenden Charakteristik einer Gauss-Funktion entsprechen.

25

Das interne Detektionssignal von Fig. 13 wird üblicherweise mit einem hochfrequenten Takt abgetastet, wie er in Fig. 14 oben dargestellt ist. Dieser Takt entspricht dem Takt am clock-Eingang in Fig. 9. Und Fig. 12. Wird ein Taktsignal mit
30 einer relativ niedrigen Frequenz f_1 gewählt, kann sich bei der Laufzeitmessung ein relativ hoher Aliasing-Fehler ergeben. Das Empfangsereignis wird in diesem Fall erst nach einer Zeit Δt_a von der Auswerteschaltung 4 erfasst. Zur Vermeidung von Aliasing-Fehlern wird vorgeschlagen, ein
35 Abtastsignal mit einer Frequenz f_2 (siehe Fig. 14 unten) zu verwenden, die deutlich höher ist als der Kehrwert der Zeitungenauigkeit (jitter) bei der Detektion einzelner Empfangsereignisse. Die Genauigkeit der Messung kann durch diese Überabtastung weiter erhöht werden, obwohl die
40 Streubreite $\pm \Delta t_j$ der Häufigkeitsverteilung der Eingangsmessgrößen gemäss Fig. 15. unverändert groß bleibt.

5

Durch die vorstehend beschriebenen Verfahren zur
Pulsauswertung kann die Messgenauigkeit eines Ultraschall-
Strömungssensors wesentlich verbessert und insbesondere
Fehlmessungen verhindert werden.

10

5 17.02.2004

ROBERT BOSCH GMBH; 70442 Stuttgart

Bezugszeichenliste

10		
	1	Fluid
	2	Strömungsrichtung
	3	Rohrleitung
	4	Steuer- und Auswerteschaltung
15	5a	erster Zähler
	5b	zweiter Zähler
	6	Modul zur Ansteuerung des ersten Zählers
	7	Modul zur Ansteuerung des zweiten Zählers
	8	Vergleichsgatter
20	9	RS-Flip-Flop
	10	AND-Gatter
	11	Anzahl der Pulspaare
	12	Pulspaar-Zähler
	13	Zählerstand lsb
25	14	Zählerstand hsb
	15	Ready-Ausgang
	16	Takteingang
	17	XOR-Gatter
	18	NOT-Gatter
30	19	OR-Gatter
	20	Nulldurchgangssignal
	t_1'	Empfangszeitpunkt des zuerst ankommenden Signals S2
	t_i''	Empfangszeitpunkte des später ankommenden Signals S1
35		
	$\Delta t'$	grobe Abschätzung der Laufzeitdifferenz
	$\Delta t_i''$	Zeitintervall eines Pulspaares
	Δt	Laufzeitdifferenz
	A_i	Pulse des zuerst ankommenden Signals S2
40	B_i	Pulse des später ankommenden Signals S1

5 17.02.2004

ROBERT BOSCH GMBH; 70442 Stuttgart

Patentansprüche

10

15

20

25

30

1. Ultraschall-Strömungssensor, insbesondere zum Messen des Volumen- oder Massestroms eines Fluids (1), das durch eine Rohrleitung (3) strömt, mit zwei in Strömungsrichtung (2) versetzt angeordneten Ultraschallwandlern (A,B) die jeweils ein periodisches Ultraschallsignal (S1,S2) an den anderen Ultraschallwandler (A,B) aussenden, und einer Steuer- und Auswerteschaltung (4), die bei Empfang eines Ultraschallsignals (S1,S2) an einem der Ultraschallwandler (A,B) mehrere Empfangszeitpunkte (t_i' , t_i'') pro Ultraschallsignal (S1,S2) detektiert, aus denen eine Messgröße (S) gebildet wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuer- und Auswerteeinheit (4) wenigstens zwei Zähler (5a,5b) umfasst, von denen der erste (5a) die vollen Intervalle ($[t_i', t_{i+1}']$) eines ersten Signals (S2,P) wenigstens bis zum ersten Empfangszeitpunkt (t_2'') eines Ultraschallsignals (S1) zählt, und der zweite Zähler (5b) jeweils eine Zeitspanne ($\Delta t''$) zwischen einem ersten (A4) und einem zweiten (B2) von mehreren paarweise zusammengefassten Schalt- bzw. Empfangszeitpunkten (t_i' , t_i'') der Signale (S1,S2,P) ermittelt.

35

2. Ultraschall-Strömungssensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Signal (S2,P) bei einer ersten Betriebsart ein Ultraschallsignal (S2) ist, das gleichzeitig mit dem anderen Ultraschallsignal (S1) ausgesendet wird, oder bei einer zweiten Betriebsart ein Referenzsignal (P) ist, das aus dem selben Taktsignal erzeugt wird aus dem auch das Ultraschallsignal (S1) erzeugt wird.

40

3. Ultraschall-Strömungssensor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die paarweise zusammengefassten

- 5 Empfangszeitpunkte (t_i', t_i'') jeweils einen Schalt- bzw. Empfangszeitpunkt (A_i) des Signals $(S2, P)$ und einen darauf folgenden Empfangszeitpunkt (B_i) des Ultraschallsignals $(S1)$ umfassen.
- 10 4. Ultraschall-Strömungssensor nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuer- und Auswerteschaltung (4) prüft, ob der erste Empfangszeitpunkt (t_1'') des Ultraschallsignals $(S1)$ zeitlich näher am vorhergehenden (t_3') oder am folgenden Schalt- bzw. Empfangszeitpunkt (t_4') des Signals $(S2, P)$ als eine vorgegebene Zeitschwelle (t_0) liegt, wobei im ersten Fall der erste Zähler (5a) die Zeitdauer $(\Delta t')$ vom ersten Schalt- bzw. Empfangszeitpunkt (t_1') bis zu demjenigen Schalt- bzw. Empfangszeitpunkt (t_3') des Signals $(S2, P)$ zählt, der dem Empfangszeitpunkt (t_1'') des Ultraschallsignals $(S1)$ vorhergeht, und im anderen Fall bis zu demjenigen Schalt- bzw. Empfangszeitpunkt (t_4') zählt, der dem ersten Empfangszeitpunkt (t_1'') des Ultraschallsignals $(S1)$ folgt.
- 20 5. Ultraschall-Strömungssensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Zähler (5b) ein Aufwärts/Abwärtszähler ist, der in Abhängigkeit von der Reihenfolge von paarweise zusammengefassten Empfangszeitpunkten (t_i', t_i'') bzw. (t_i'', t_i') entweder aufwärts oder abwärts zählt.
- 30 6. Ultraschall-Strömungssensor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Zähler (5a) ein Aufwärts/Abwärtszähler ist, der sowohl einen positiven als auch einen negativen Übertrag vom zweiten Zähler (5b) erhalten kann.
- 35 7. Ultraschall-Strömungssensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Zähler die Zeitdauer $(\Delta t'')$ der Intervalle akkumuliert, die von p Paaren
- 40

5 von Empfangszeitpunkten (t_i', t_i'') gebildet werden, wobei p eine Zweierpotenz ist.

8. Ultraschall-Strömungssensor nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass nach einer Messung der Zeitdauer der aus
10 p Paaren gebildeten Intervalle der Zählerstand des zweiten Zählers (5b) durch eine Schieberegisteroperation oder durch Weglassen von Binärstellen oder durch eine geänderte Interpretation der Wertigkeit der Binärstellen gemittelt wird.

15

9. Verfahren zum Ermitteln der Laufzeitdifferenz (Δt) zweier Ultraschallsignale ($S1, S2$) eines Ultraschall-Strömungssensors mit zwei in Strömungsrichtung (2) versetzt angeordneten Ultraschallwandlern (A,B) die jeweils ein Ultraschallsignal
20 ($S1, S2$) an den anderen Ultraschallwandler (B,A) aussenden, und einer Steuer- und Auswerteschaltung (4), die bei Empfang eines Ultraschallsignals ($S1, S2$) an einem der Ultraschallwandler (A,B) mehrere Empfangszeitpunkte (t_i', t_i'') pro Ultraschallsignal ($S1, S2$) detektiert, aus denen eine
25 Messgröße (S) gebildet wird, dadurch gekennzeichnet, dass mittels eines ersten Zählers (5a) eine Zeitdauer ($\Delta t'$) der vollen Intervalle $([t_i', t_{i+1}'])$ eines Signals ($S2, P$) bis wenigstens zum ersten Empfangszeitpunkt (t_1'') eines Ultraschallsignals ($S1$) gezählt wird, und mittels eines
30 zweiten Zählers (5b) jeweils die Zeitspannen ($\Delta t''$) zwischen einem ersten und einem zweiten von mehreren paarweise zusammengefassten Empfangszeitpunkten (t_i', t_i'') ermittelt werden.

35

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Zähler (5b) die Zeitdauern ($\Delta t_i''$) zwischen mehreren paarweise zusammengefassten Zeitpunkten (t_i', t_i'') misst, die jeweils einen Schalt- bzw. Empfangszeitpunkt (t_i') des Signals ($S2, P$) und einen Empfangszeitpunkt (t_i'') des
40 Ultraschallsignals ($S1$) umfassen.

- 5 11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch
gekennzeichnet, dass geprüft wird, ob der erste
Empfangszeitpunkt (t_1'') des Ultraschallsignals (S1) zeitlich
näher am vorhergehenden (t_3') oder am folgenden Schalt- bzw.
Empfangszeitpunkt (t_4') des Signals (S2,P) als eine
10 vorgegebene Zeitschwelle (t_0) liegt, wobei im ersten Fall der
erste Zähler (5a) die Zeitdauer ($\Delta t'$) vom ersten Schalt- bzw.
Empfangszeitpunkt (t_1') bis zu demjenigen Schalt- bzw.
Empfangszeitpunkt (t_3') des Signals (S2,P) zählt, der dem
Empfangszeitpunkt (t_1'') des Ultraschallsignals (S1)
15 vorhergeht, und im anderen Fall bis zu demjenigen Schalt-
bzw. Empfangszeitpunkt (t_4') zählt, der dem ersten
Empfangszeitpunkt (t_1'') des Ultraschallsignals (S1) folgt.
- 20 12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9-11, dadurch
gekennzeichnet, daß ein digitales Signal der
Auswerteschaltung (4), das den Empfang eines
Empfangsereignisses (A_i , B_i) anzeigt, mit einem Abtastsignal
abgetastet wird, dessen Frequenz deutlich höher ist als der
Kehrwert der Zeitungenauigkeit (Δt_j) des Signals (20).
- 25

5 17.02.2004

ROBERT BOSCH GMBH; 70442 Stuttgart

Zusammenfassung

10

Bestimmung der Laufzeitdifferenz bei einem Ultraschall-
Strömungssensor mit mehrfacher Nulldurchgangsdetektion

15

20

25

30

Die Erfindung betrifft einen Ultraschall-Strömungssensor, insbesondere zum Messen eines Volumen- oder Massestroms eines Fluids (1), mit zwei in Strömungsrichtung (2) versetzt angeordneten Ultraschall-Wandlern (A,B), die jeweils ein periodisches Ultraschallsignal (S1,S2) an den anderen Ultraschall-Wandler (B,A) aussenden, und einer Steuer- und Auswerteeinheit (4), die bei Empfang eines Ultraschallsignals (S1,S2) an einem der Ultraschallwandler (A,B) jeweils mehrere Empfangszeitpunkte (t_i' , t_i'') pro Ultraschallsignal (S1,S2) detektiert, aus denen eine Messgröße (S) ermittelt wird. Die Genauigkeit der Messung kann wesentlich verbessert werden, wenn die Steuer- und Auswerteeinheit (4) wenigstens zwei Zähler (5a,5b) umfasst, von denen der erste eine Zeitdauer ($\Delta t'$) von einem ersten Schalt- bzw. Empfangszeitpunkt (t_1') eines Signals (S2,P) wenigstens bis zum ersten Empfangszeitpunkt (t_1'') des Ultraschallsignals (S1) zählt, und der zweite Zähler jeweils die Zeitspanne ($\Delta t''$) zwischen einem ersten und einem zweiten von mehreren paarweisen zusammengefassten Zeitpunkten (t_i' , t_i'') der Signale (S1,S2,P) ermittelt.

35 Fig. 6

1 / 9

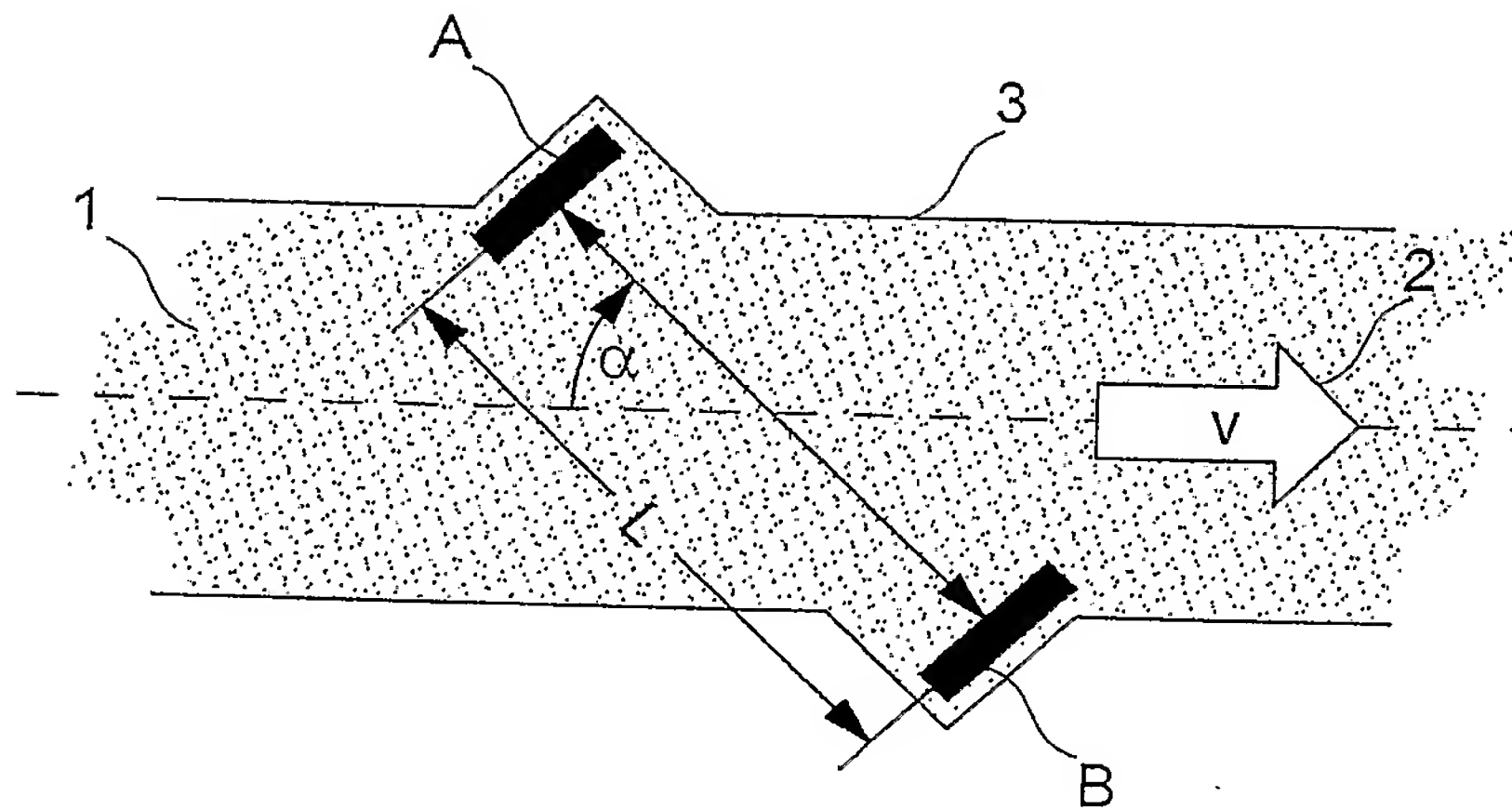


Fig. 1

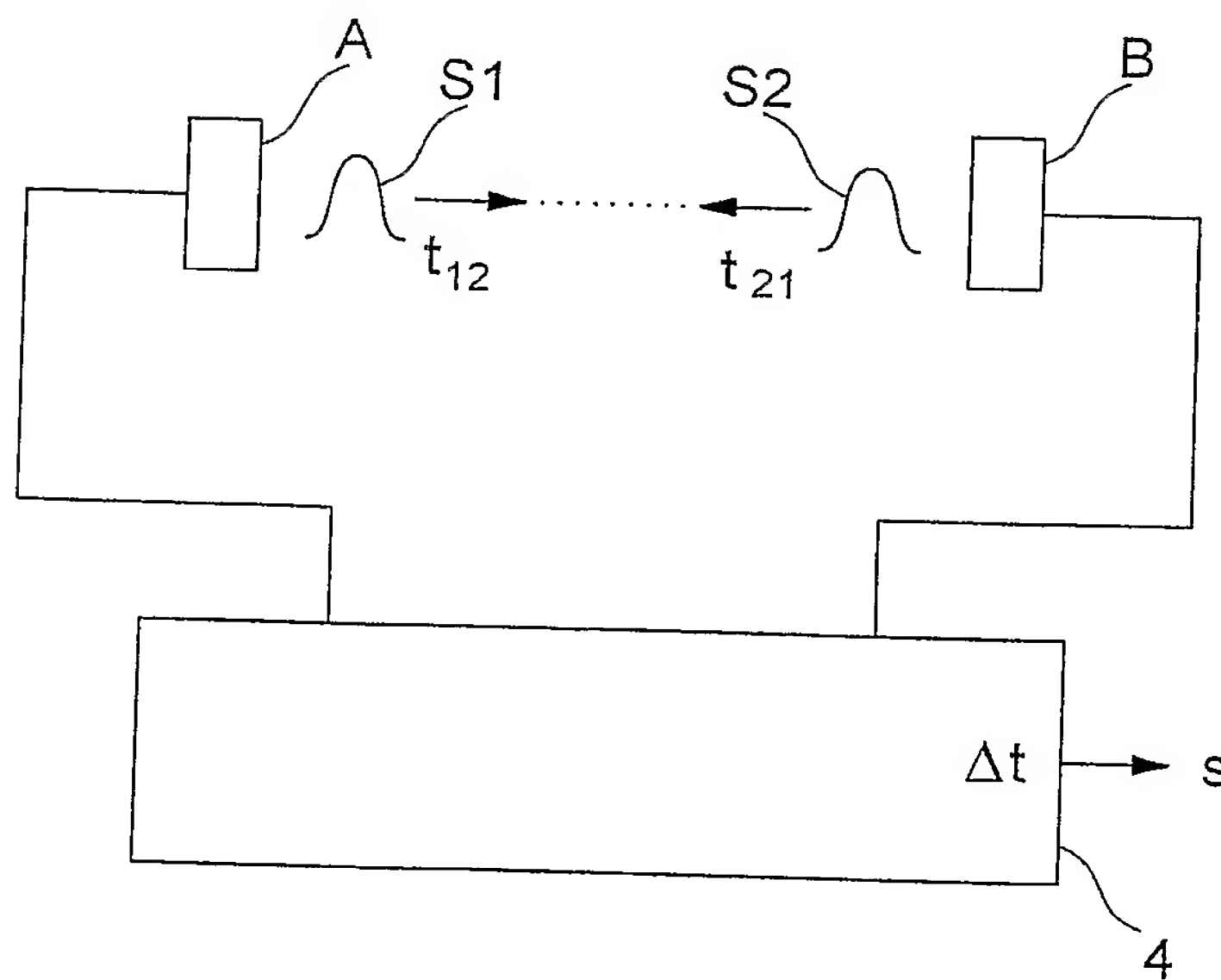


Fig. 2

2 / 9

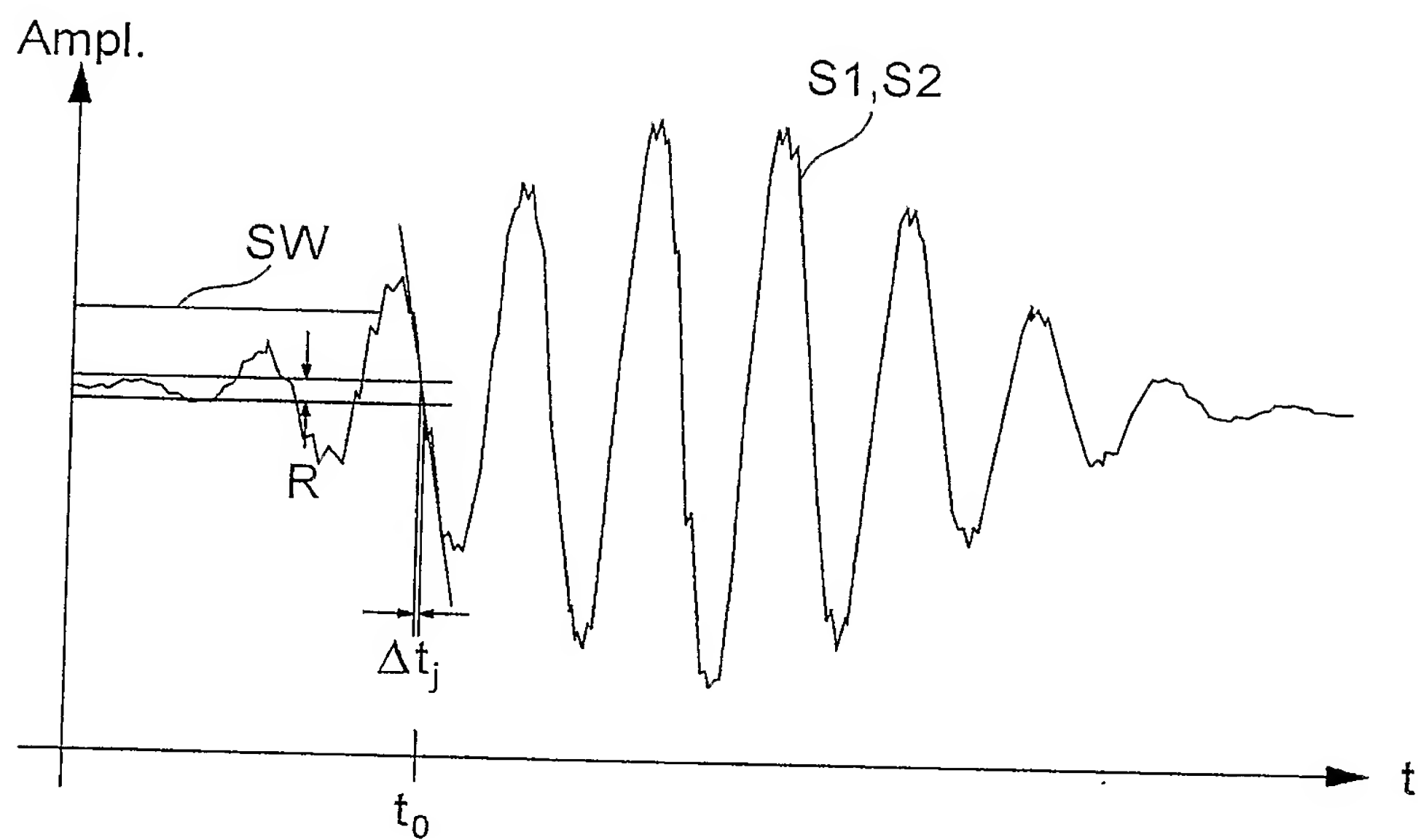


Fig. 3

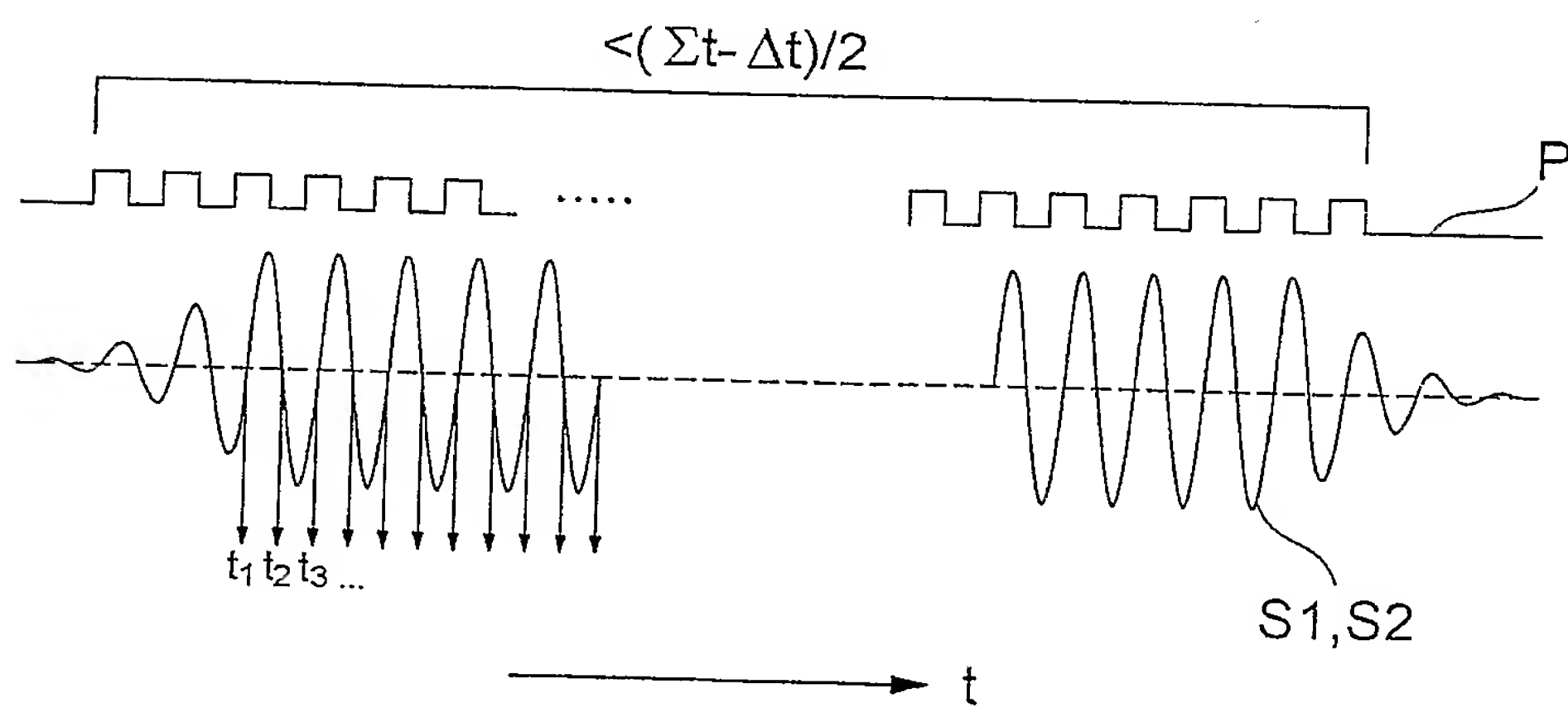


Fig. 4

3 / 9

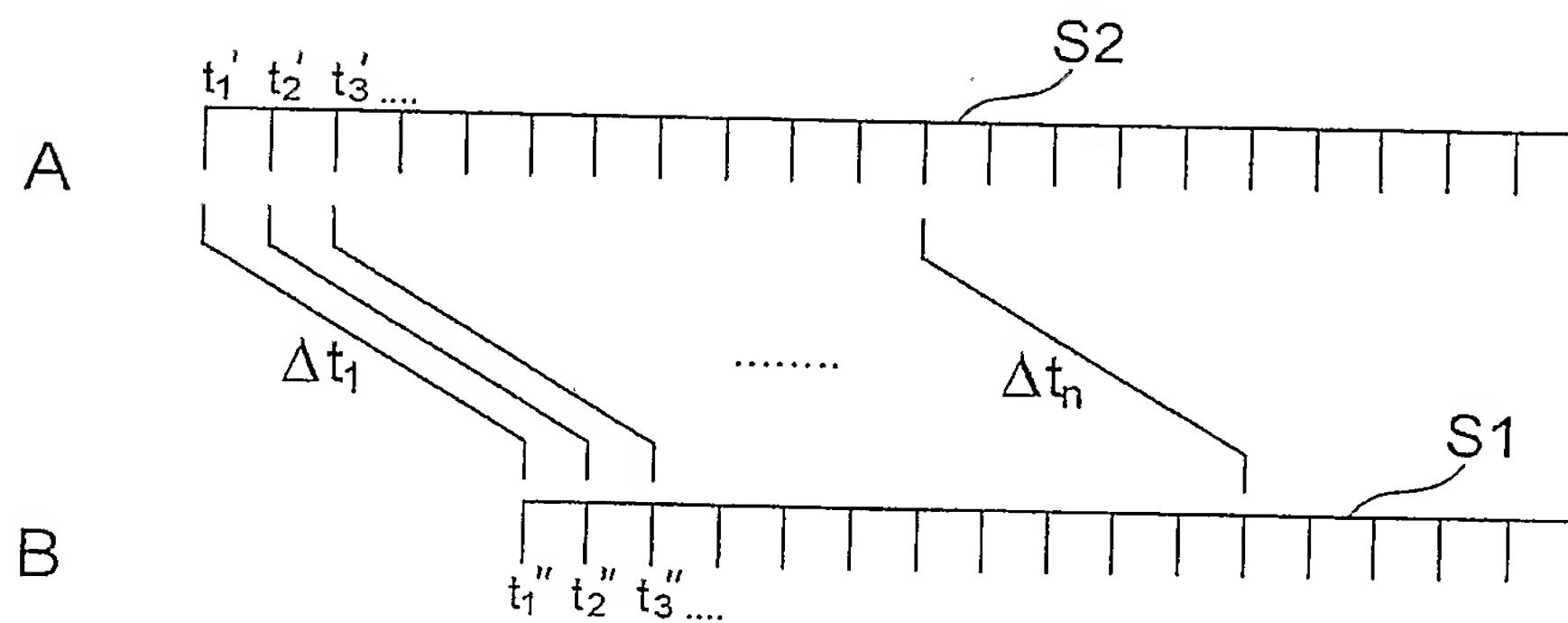


Fig. 5

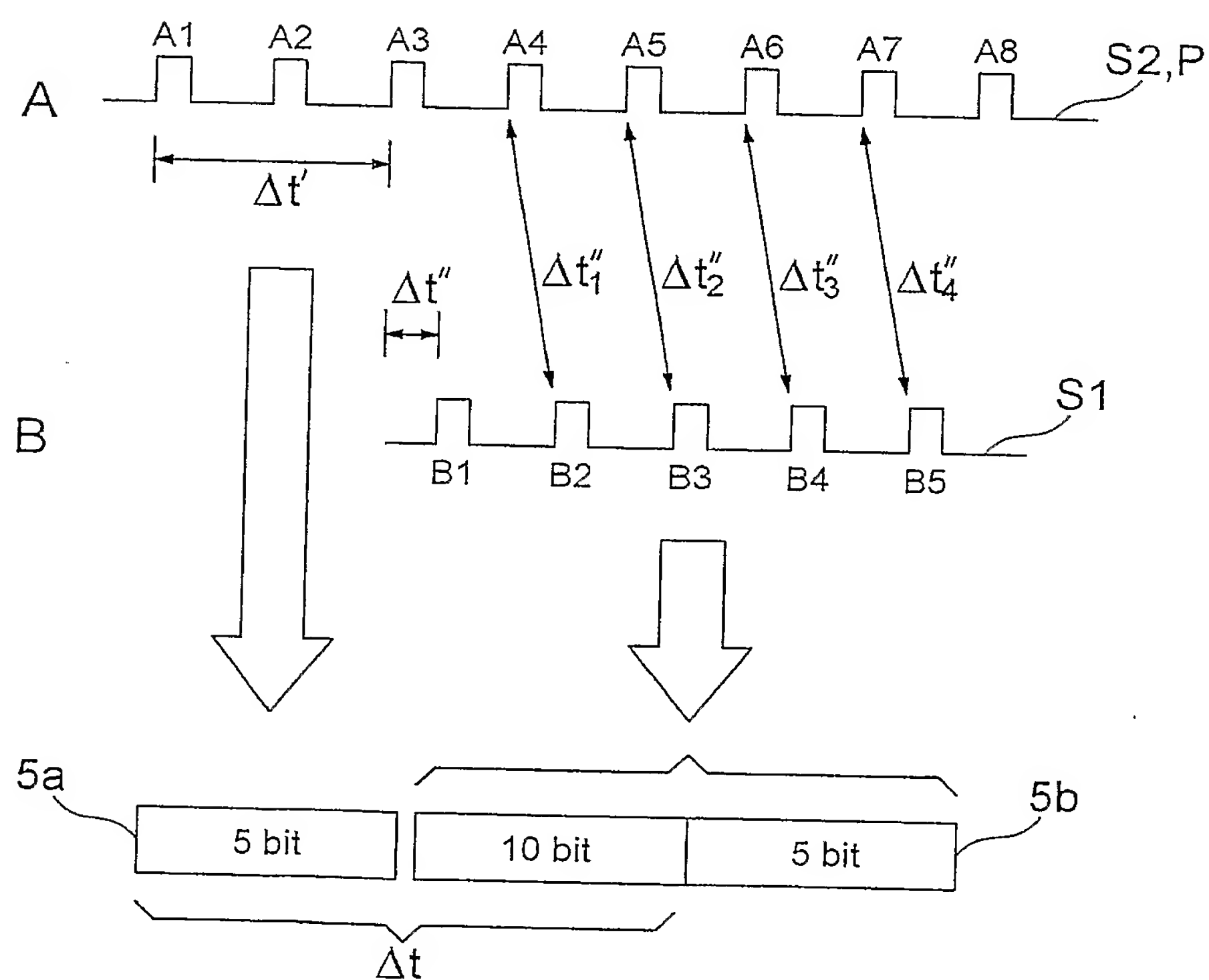


Fig. 6

4 / 9

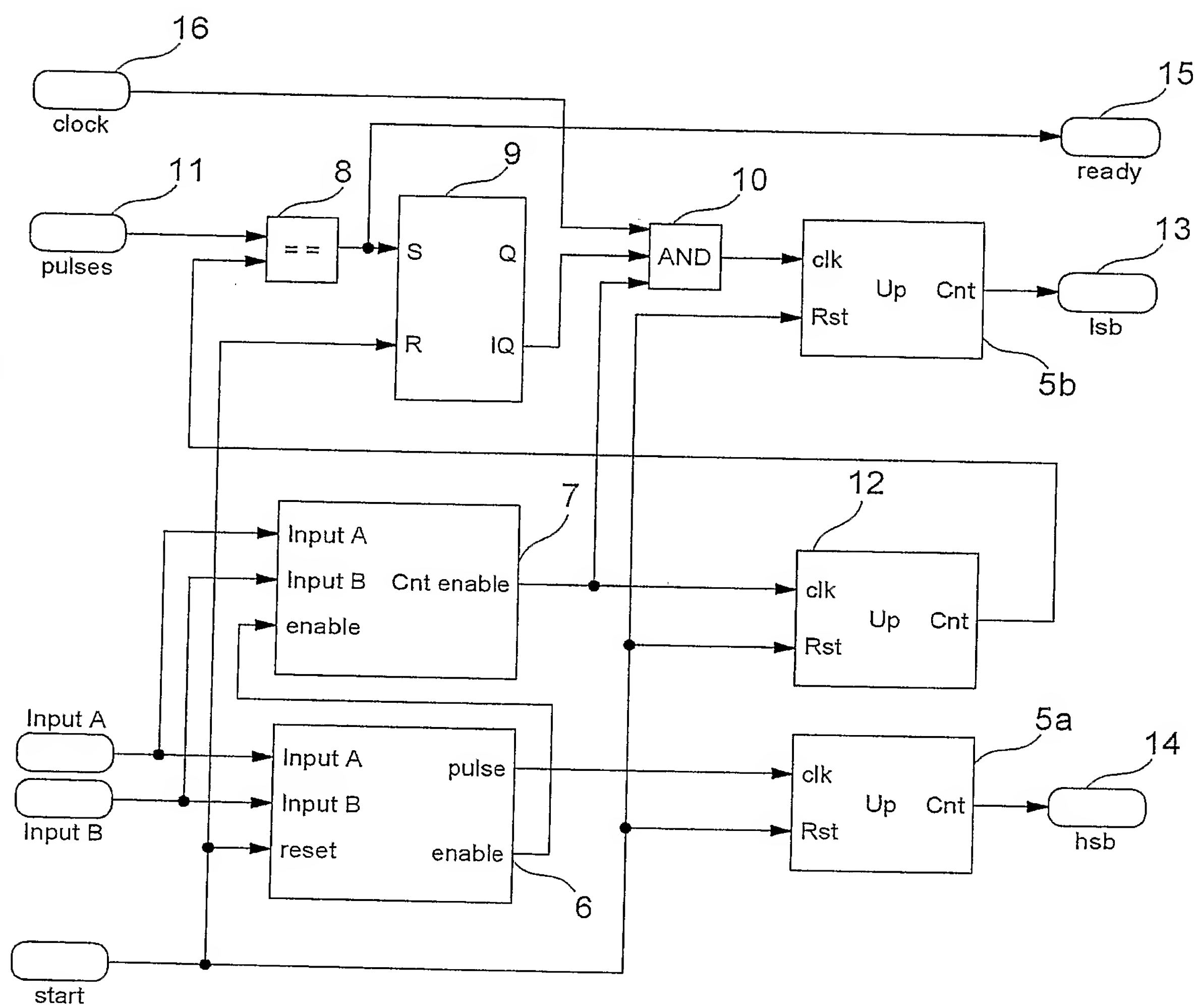


Fig. 7

5 / 9

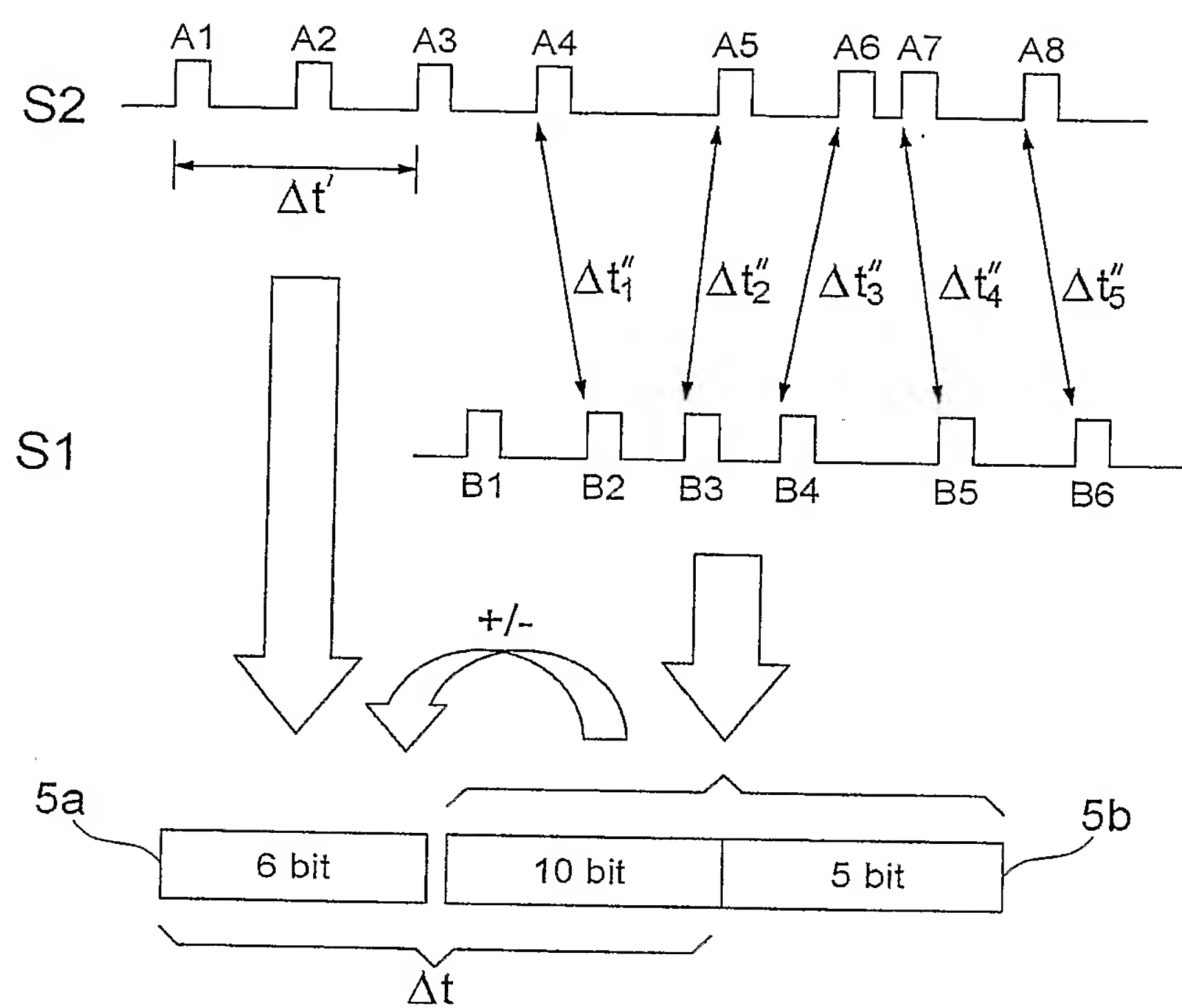


Fig. 8

6 / 9

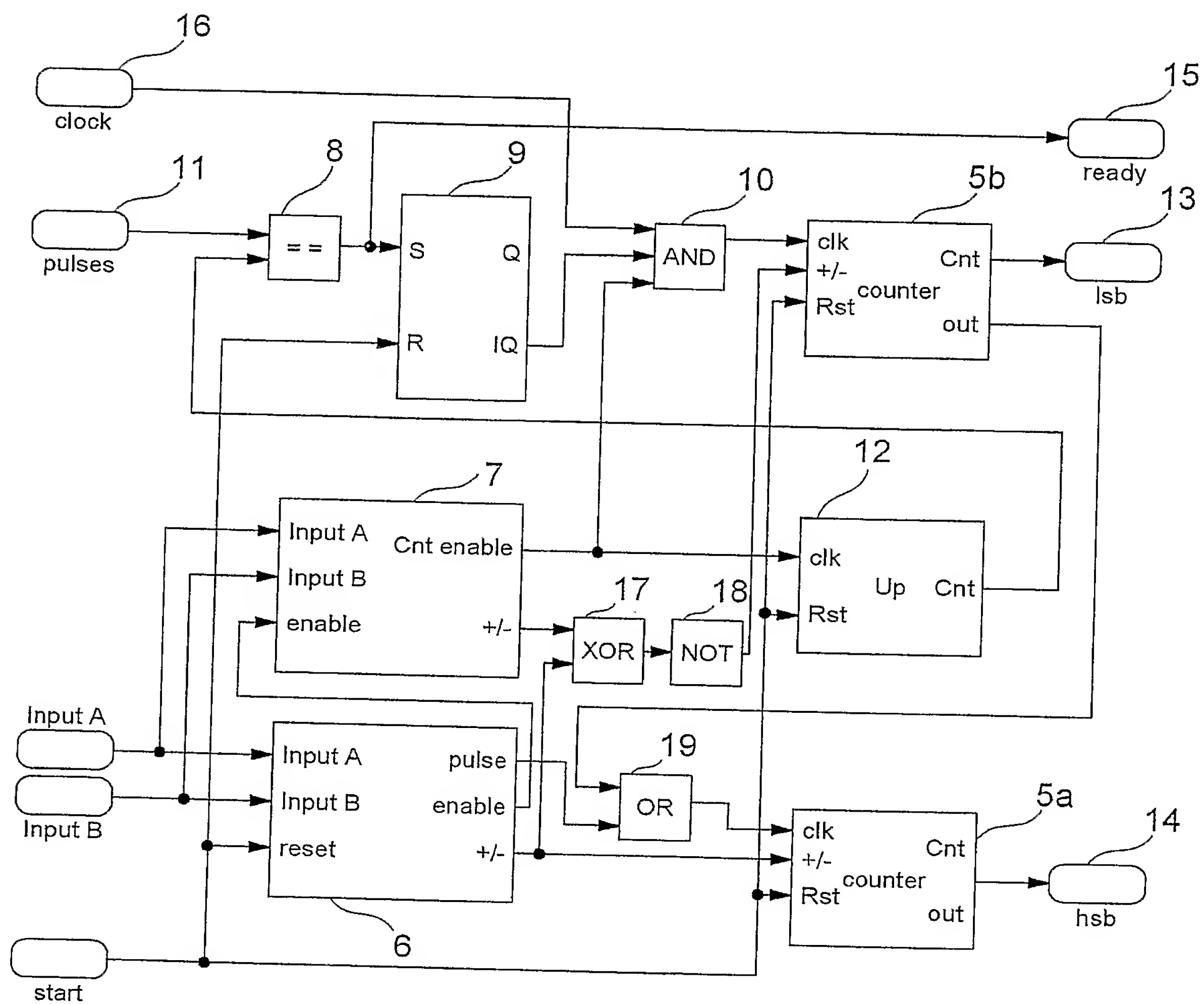


Fig. 9

7 / 9

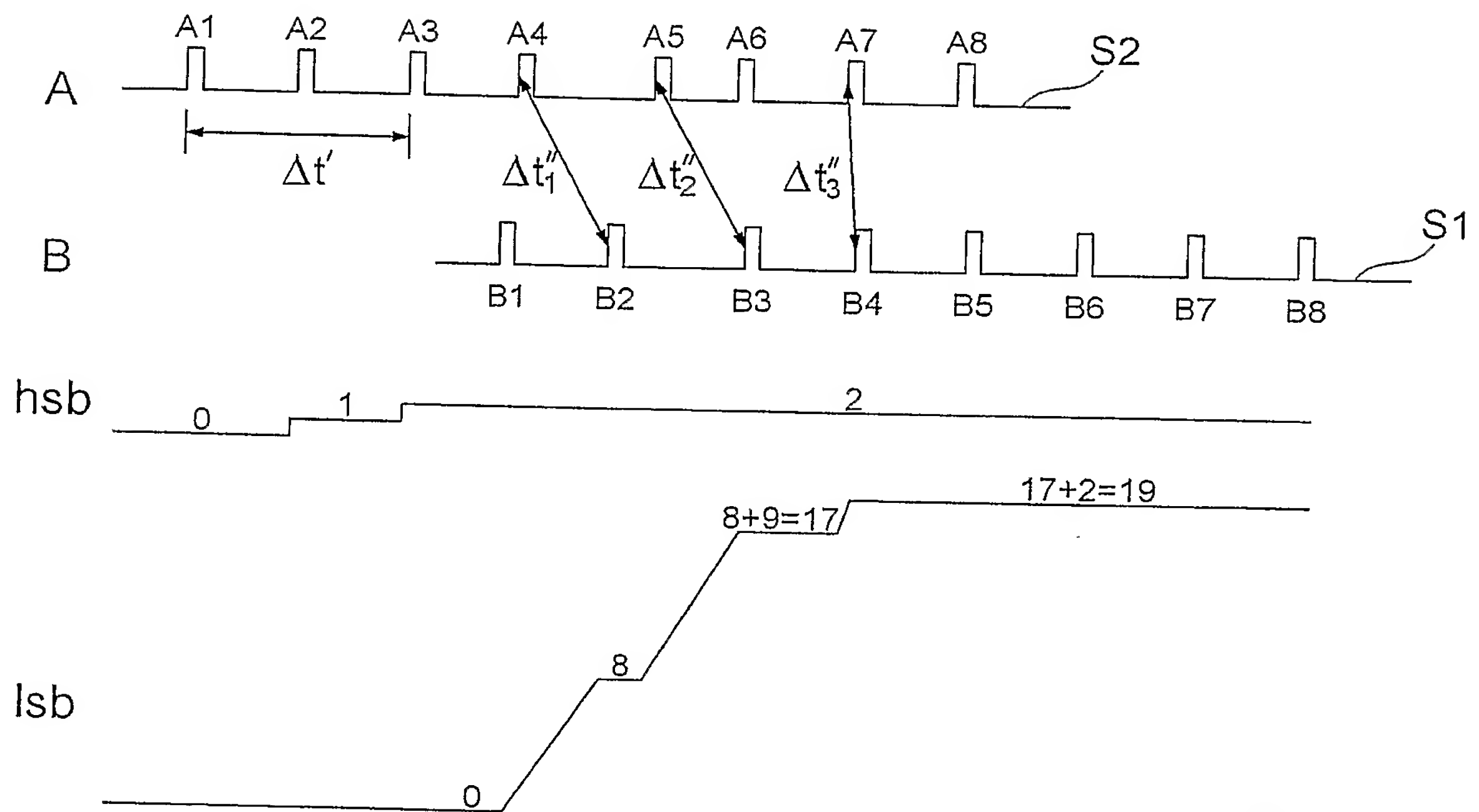


Fig. 10

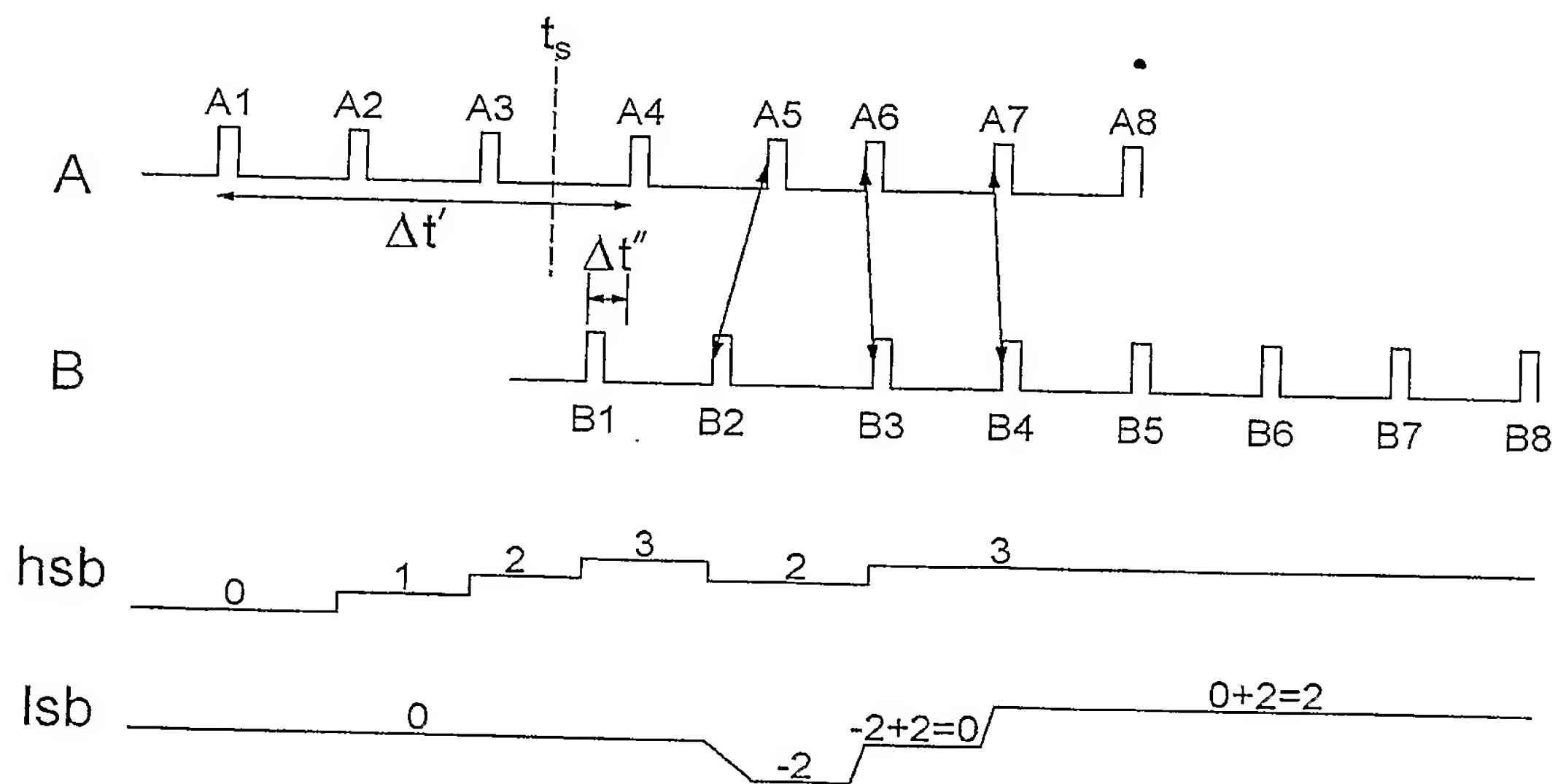


Fig. 11

8 / 9

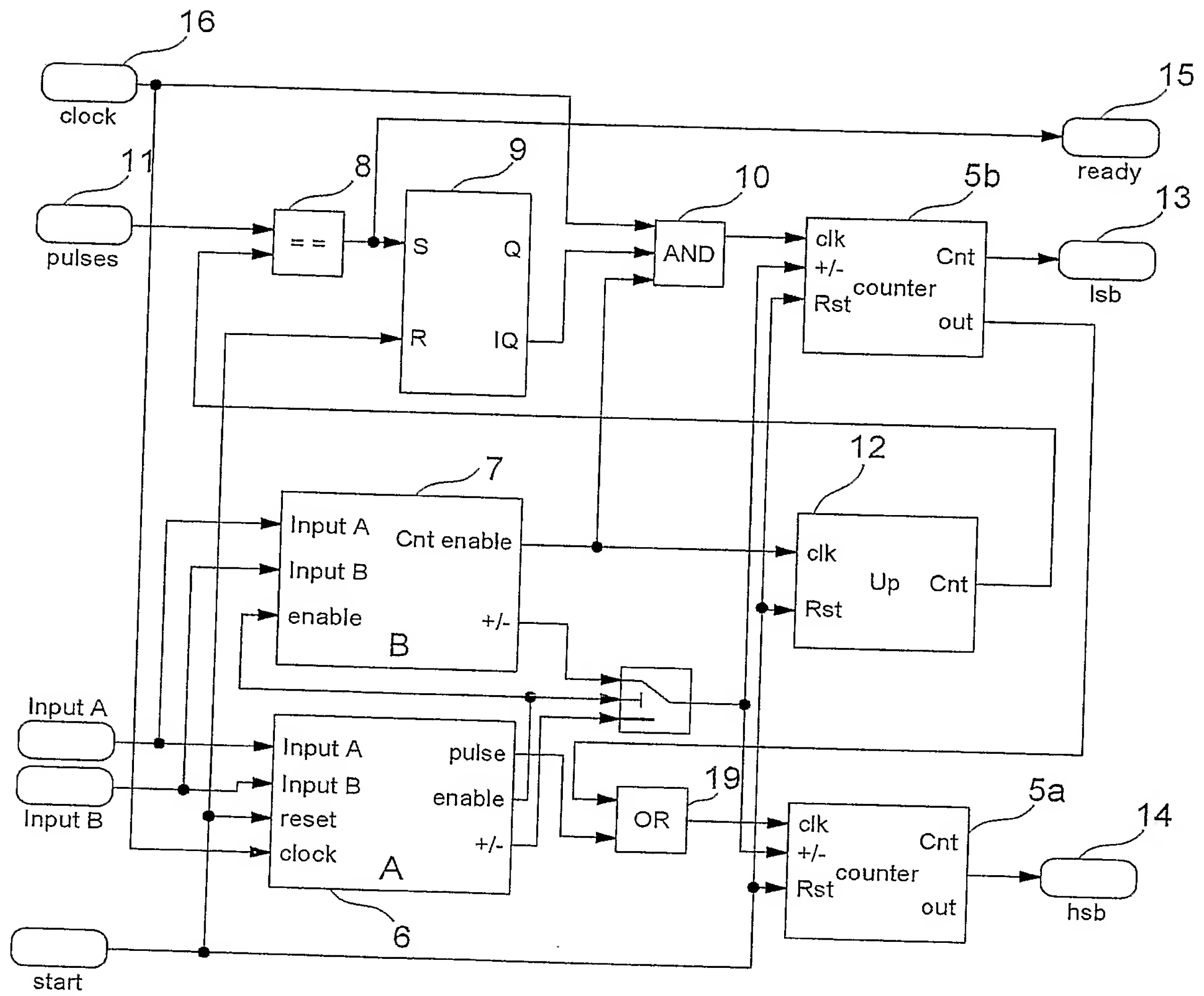


Fig. 12

9 / 9

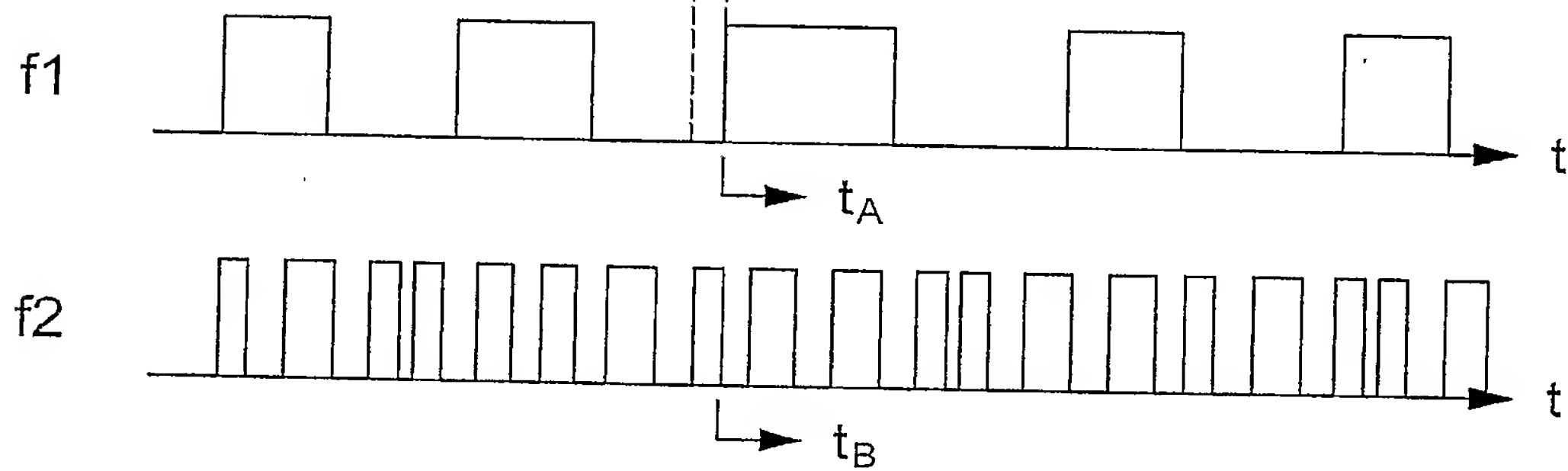
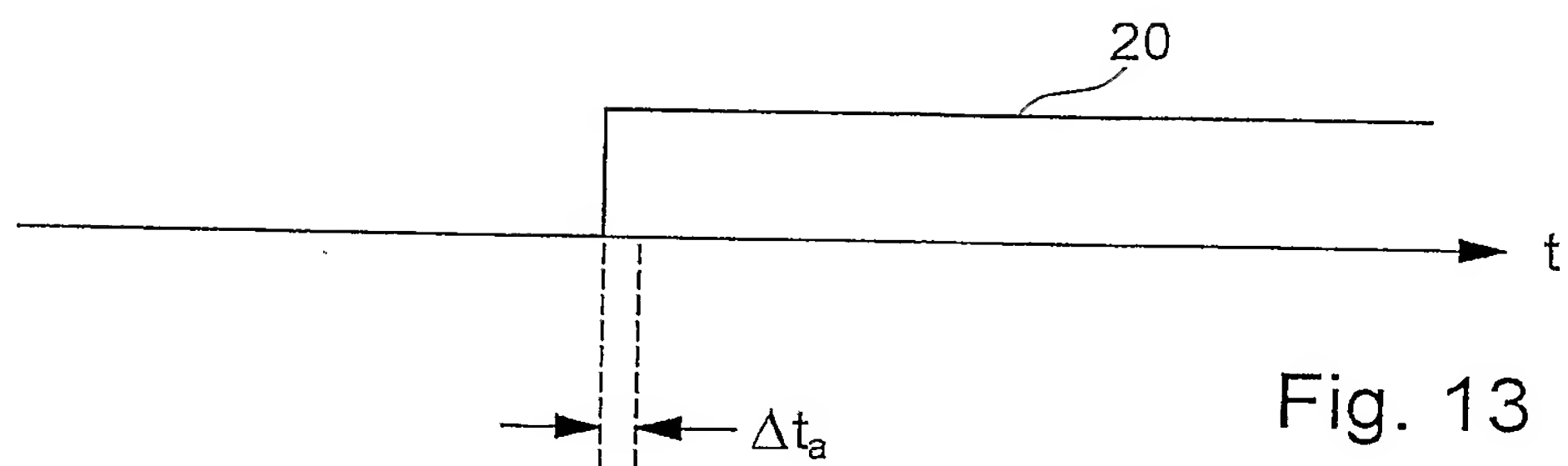


Fig. 14

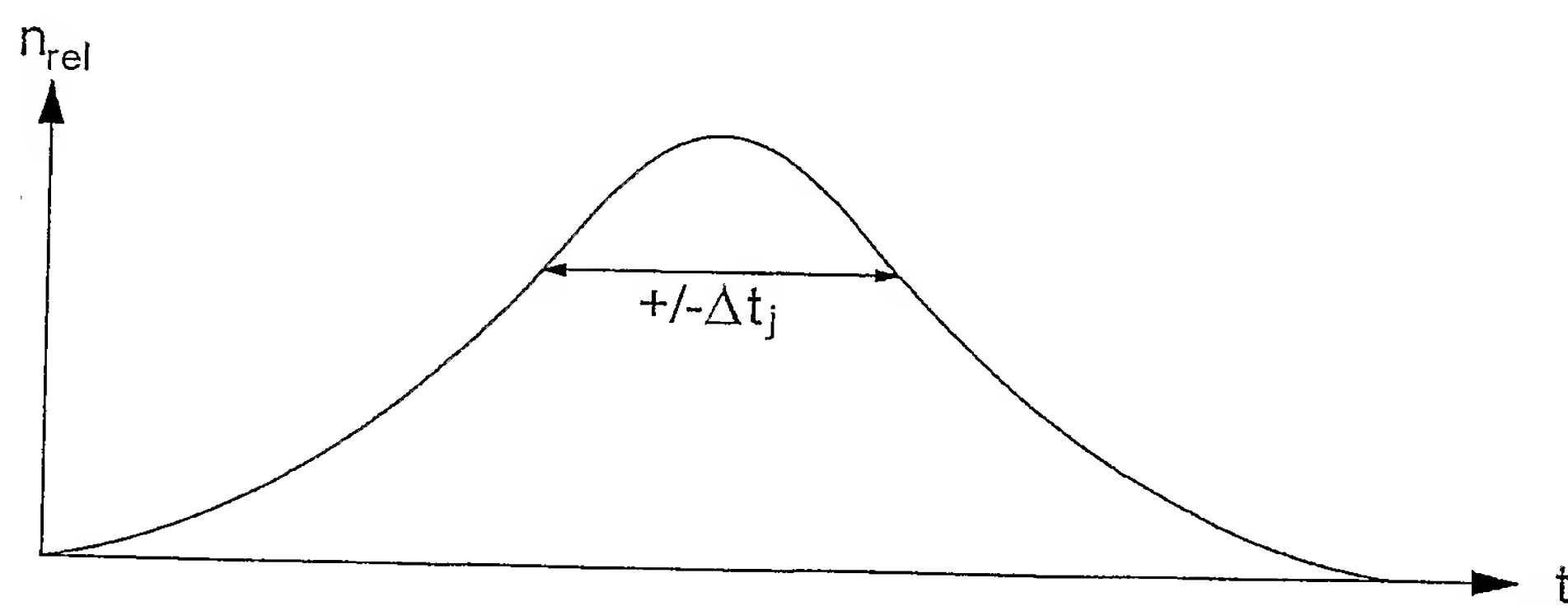


Fig. 15